

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais

PPGE-3M

DESENVOLVIMENTO DE UM MÓDULO DE COMPENSAÇÃO PARA AJUSTE
DE DESLOCAMENTO UTILIZANDO MOLAS DE POLIURETANO

Fabiano Bertoni

Dissertação para obtenção do título de Mestre
em Engenharia

Porto Alegre
2010

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais

PPGE-3M

DESENVOLVIMENTO DE UM MÓDULO DE COMPENSAÇÃO PARA AJUSTE
DE DESLOCAMENTO UTILIZANDO MOLAS DE PÓLIURETANO

FABIANO BERTONI
Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE-3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre
2010

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Eduardo Fortis Kwietniewski;

Prof. Dr. Rogério José Marczak;

Dr. Eng. Ricardo Callegari Jacques.

Prof. Dr. Carlos Perez Bergmann
Coordenador do PPGEM

"O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário".

(Albert Einstein)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente e acima de tudo, a Deus.

Especialmente aos meus pais, Jayme e Idelma Bertoni, por acreditarem na educação como um bem maior.

Especialmente a minha noiva, Ana Paula Santin, pelo companheirismo, compreensão e ajuda principalmente nos momentos de dificuldade.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelo ensino público, gratuito e de qualidade.

Ao programa de pós-graduação PPGE-3M.

Aos professores do curso de Engenharia Mecânica pelos inúmeros ensinamentos.

Ao Laboratório de Metalurgia Física por oportunizar este e tantos outros trabalhos.

Ao Prof. Telmo Roberto Strohaecker pela paciência e orientação neste trabalho.

Ao Eng. Claudio J. Almiron pelos intensos auxílios nos ensaios mecânicos.

Especialmente ao Msc. Eng. Gabriel Alejandro Tarnonwisk, pela orientação e ensinamentos, além da confiança creditada para a realização deste trabalho.

A todo o grupo PROENG-EC pelo companheirismo e contribuição nos diversos trabalhos.

Ao grupo TS, por acreditarem em um novo ideal.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	6
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	11
RESUMO	12
ABSTRACT	13
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO.....	5
1.2 OBJETIVO.....	6
1.3 ANÁLISE DE MODELOS.....	7
1.3.1 Modelo de molas em aço.....	7
1.3.2 Modelo de cilindros hidráulicos.....	8
1.3.3 Modelo de molas poliméricas.....	9
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 ELASTÔMEROS.....	11
2.2 SELEÇÃO DE MATERIAIS ELASTÔMEROS.....	16
2.2.1 Funcionalidade.....	16
2.2.2 Confiabilidade e Durabilidade.....	16
2.2.3 Considerações de segurança.....	17
2.2.4 Custo.....	17
2.3 ENGENHARIA E ELASTÔMEROS.....	18
2.4 COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS ELASTÔMEROS SOB DEFORMAÇÃO.....	20
2.4.1 Comportamento típico dos elastômeros.....	20
2.4.2 Efeitos das variáveis de carregamento e do meio.....	22
2.5 ELASTÔMEROS DE POLIURETANO.....	29
2.5.1 Química dos elastômeros de poliuretano.....	30
2.5.2 Matérias-primas.....	31
2.5.3 Propriedades Físicas.....	34
2.6 ELASTICIDADE NÃO-LINEAR.....	43
2.6.1 Definição dos componentes de tensão.....	43
2.6.2 Definição dos componentes de deformação.....	45
2.6.3 Energia de Deformação.....	47
2.7 ELASTICIDADE EM ELASTÔMEROS.....	48
2.8 MODELOS CONSTITUTIVOS PARA ELASTICIDADE EM ELASTÔMEROS.....	50
2.8.1 Tratamento estatístico.....	51
2.8.2 Modelo de Mooney.....	54
2.8.3 Modelo de Rivlin.....	55
2.8.4 Modelo de Rivlin e Saunders.....	56
2.8.5 Modelo de Gent e Thomas.....	56
2.8.6 Modelo de Ogden.....	56
2.8.7 Modelo de Van der Waals.....	57
2.8.8 Modelo de Yeoh.....	57
2.8.9 Modelo Polinomial.....	58
3 MATERIAIS E MÉTODOS	59
3.1 MEDIÇÃO DE DUREZA.....	60
3.2 ENSAIO DE COMPRESSÃO.....	60
3.2.1 ASTM D 695.....	61
3.2.2 ASTM D 575.....	61
3.3 ENSAIO DE FADIGA EM COMPRESSÃO.....	62
3.3.1 Controle de Deslocamento.....	63
3.3.2 Controle de Força.....	64
3.4 SELEÇÃO DO MODELO CONSTITUTIVO.....	65
3.4.1 Avaliação do erro dos modelos hiperelásticos.....	65
3.4.2 Validação do modelo selecionado.....	67
3.5 DIMENSIONAMENTO DA MOLA.....	67
3.6 CARACTERIZAÇÃO DA MOLA EM ESCALA 1:5.....	68
3.6.1 Ensaios Cíclicos de Compressão.....	69
3.6.2 Ensaio Patamar de Carregamento.....	71

3.6.3	Ensaio de fadiga em compressão na mola 1:5	72
3.7	ENSAIO DE COMPRESSÃO DA MOLA EM ESCALA REAL	73
3.8	MÓDULO DE COMPENSAÇÃO EM ESCALA 1:5	73
3.8.1	Ensaio com controle de força	74
3.9	PROJETO DO MÓDULO DE COMPENSAÇÃO	76
3.9.1	Distribuição dos esforços na bancada	76
3.9.2	Variação da rigidez do conjunto	77
3.9.3	Geometria do módulo de compensação	78
3.9.4	Seleção do número e geometria de molas	80
4	RESULTADOS	81
4.1	MEDIÇÃO DE DUREZA	81
4.2	ENSAIOS DE COMPRESSÃO	81
4.2.1	ASTM D 695	81
4.2.2	ASTM D 575	84
4.2.3	Comparação entre os ensaios de compressão	87
4.3	ENSAIO DE FADIGA EM COMPRESSÃO	87
4.3.1	Controle de Deslocamento	88
4.3.2	Controle de Força	90
4.4	SELEÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL	91
4.4.1	Validação do modelo hiperelástico	93
4.5	CARACTERIZAÇÃO DA MOLA EM ESCALA 1:5	95
4.5.1	Ensaio cíclicos de compressão	95
4.5.2	Ensaio Patamar de Carregamento	98
4.5.3	Ensaio de fadiga em compressão na mola 1:5	100
4.6	ENSAIO DE COMPRESSÃO DA MOLA EM ESCALA REAL	101
4.7	MÓDULO DE COMPENSAÇÃO EM ESCALA 1:5	102
4.8	MÓDULO DE COMPENSAÇÃO EM ESCALA REAL	105
5	CONCLUSÃO	108
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução das reservas provadas de petróleo, por localização (terra e mar) – 1999-2008 (ANP 2009).....	1
Figura 2 - Plataformas flutuantes.	2
Figura 3 - Representação das camadas de um <i>riser</i>	2
Figura 4 - Esquema representando a aplicação de linhas flexíveis e rígidas.	3
Figura 5 - Aplicação externa de <i>Bend Stiffeners</i>	4
Figura 6 - Aplicação submersa de <i>Bend Stiffeners</i>	4
Figura 7 - Máquina de ensaios desenvolvida no LAMEF.	5
Figura 8 - <i>Bend Stiffeners</i> submersos em uma FPSO.	6
Figura 9 - Redução da linha flexível e deslocamento representativo “D”.	7
Figura 10 - Módulo de compensação com molas de aço.	8
Figura 11 - Módulo de compensação com cilindros hidráulicos.	9
Figura 12 - Módulo de compensação com molas poliméricas.	9
Figura 13 - Morfologia dos polímeros.	12
Figura 14 - Curvas tensão-deformação de tração dos polímeros nas três fases: vítreo, cristalino e borrachoso.	12
Figura 15 - Ilustração da estrutura dos elastômeros formados por ligações cruzadas químicas e físicas respectivamente.	13
Figura 16 - Custo e desempenho dos principais elastômeros comerciais.	18
Figura 17 - Esquema dos principais ensaios aplicados na caracterização dos materiais elastômeros (Hibbitt, Karlsson et al. 2008)	21
Figura 18 - Comportamento comum dos elastômeros sob tensão em três ensaios, uniaxial, biaxial e planar (Miller(a) 2000).	22
Figura 19 - Compressão uniaxial em três diferentes taxas de deformação (Qi and Boyce 2005).	23
Figura 20 - Comportamento tensão-deformação com tempo de relaxação de 20s (Bergstrom and Boyce 2000).	24
Figura 21 - Laços de histerese (Qi and Boyce 2005).	25
Figura 22 - Comportamento idealizado do efeito Mullins.	25
Figura 23 - Comportamento real dos elastômeros.	26
Figura 24 - Configuração da estrutura molecular dos elastômeros pela teoria de Mullins e Tobin.	27
Figura 25 - Variação do comportamento mecânico dos elastômeros com o aumento de temperatura ($T_1 \rightarrow T_7$).	27
Figura 26 - Comportamento tensão-deformação de um ensaio de compressão uniaxial em diferentes temperaturas.	28
Figura 27 - Compressão uniaxial a diferentes temperaturas.	29
Figura 28 - Morfologia de duas fases: a rígida e a flexível.	30
Figura 29 - Reação de formação dos grupos de poliuretanos.	30
Figura 30 - Estrutura química dos diisocianatos MDI, HMDI e TDI.	32
Figura 31 – Macro glicóis utilizados na síntese do poliuretano.	33
Figura 32 - Extensores de cadeia.	33
Figura 33 - Aplicação do elastômero de poliuretano.	35
Figura 34 - Propriedades mecânicas em tração de alguns elastômeros. (AirProducts 2008)....	36
Figura 35 - Relação dureza e tensão em 50% e 100% de alongamento em tração. (AirProducts 2008)	37
Figura 36 - Propriedades mecânicas em compressão de alguns elastômeros.(AirProducts 2008)	38
Figura 37 - Relação dureza e tensão em 5% e 10% de deflexão em compressão. (AirProducts 2008)	39
Figura 38 - Esquema da máquina de ensaios para geração de calor.(AirProducts 2008)	40
Figura 39 - Geração de calor dinâmico. (AirProducts 2008).....	41
Figura 40 - Perda de massa acumulativa por abrasão junto ao aço. (AirProducts 2008)	43
Figura 41 - Componentes de tensão.	44
Figura 42 - Deslocamento do ponto P para P'.	45
Figura 43 - Deformações do cubo em um paralelepípedo definindo as razões de deformação.	46

Figura 44 - Deformação de uma esfera.	46
Figura 45 - Curva de tração de um elastômero comum.	49
Figura 46 - Cadeia livremente distribuída.	52
Figura 47 – Modelos de estruturas de rede de (a) rede de 3 cadeias, (b) 4 cadeias, (c) 8 cadeias e (d) modelo de rede completa (Boyce and Arruda 2000).	53
Figura 48 - Máquinas de ensaio utilizadas na caracterização mecânica.	59
Figura 49 - Durômetro Shore A manual.	60
Figura 50 - Dimensões do espécime conforme ASTM D695.	61
Figura 51 - Dimensões do espécime conforme ASTM D575.	62
Figura 52 - Dimensões dos espécimes.	62
Figura 53 - Montagem do ensaio de fadiga em compressão.	63
Figura 54 - Carregamento do ensaio de controle de deslocamento.	64
Figura 55 - Carregamento no ensaio de controle de força.	65
Figura 56 - Dimensões finais da mola.	68
Figura 57 - Geometria da Mola em escala 1:5.	69
Figura 58 - Perfil de carregamento nos três primeiros ciclos.	71
Figura 59 - Perfil de aplicação e retirada de carga no ensaio de patamar.	72
Figura 60 - Perfil de carregamento do ensaio de fadiga em compressão da mola 1:5.	73
Figura 61 - Ensaio de compressão na mola em escala real.	73
Figura 62 - Componentes do modelo do módulo de compensação. 1 – base do conjunto; 2 – base de apoio da primeira camada de molas; 3 – primeira camada de molas; 4 – base de apoio da segunda camada de molas; 5 – segunda camada de molas; 6 – chapa de fechamento do conjunto e aplicação de carga; 7 – anel centralizador das guias; 8 – guias com buchas de deslizamento.	74
Figura 63 - Distribuição das molas em cada camada.	74
Figura 64 - Protótipo na máquina de ensaios.	75
Figura 65 - Perfil de carregamento no protótipo em escala 1:5.	75
Figura 66 - Distribuição de esforços na bancada de ensaios na carga e ângulo máximo.	77
Figura 67 - Configuração variável das camadas de molas.	78
Figura 68 - Geometria final do módulo de compensação.	78
Figura 69 - Fixação do módulo de compensação na bancada de ensaios.	79
Figura 70 - Bancada de ensaios preparada para o ensaio experimental.	79
Figura 71 - Dimensões das três possíveis geometrias de molas.	80
Figura 72 - Perfil de dureza nos espécimes para caracterização mecânica.	81
Figura 73 - Flambagem devido a falta de alinhamento.	82
Figura 74 - Ensaio de compressão ASTM D695 e espécimes ensaiados.	83
Figura 75 - Curva tensão-deformação no ensaio de compressão conforme a norma ASTM D695.	83
Figura 76 - Curva de tensão-deformação verdadeira e de engenharia durante o carregamento no ensaio de compressão.	84
Figura 77 - Variação das curvas tensão-deformação de engenharia conforme a condição de contato com os pratos da máquina de ensaios.	85
Figura 78 - Ensaio de compressão ASTM D575 com lixas entre o espécime e os pratos da máquina de ensaios.	86
Figura 79 - Curva tensão-deformação em três ciclos de carregamento no espécime com lixa d'água 200.	86
Figura 80 - Comparação entre os ensaios de compressão.	87
Figura 81 - Laços de histerese com controle de deslocamento.	88
Figura 82 - Máximos e mínimos do ensaio de histerese com controle de deslocamento.	89
Figura 83 - Modelos viscoelásticos de três parâmetros.	89
Figura 84 - Laços de histerese com controle de força.	90
Figura 85 - Máximos e mínimos do ensaio de histerese com controle de força.	91
Figura 86 - Curva de calibração dos modelos hiperelásticos.	92
Figura 87 - Curvas de ajuste dos modelos computacionais utilizados.	93
Figura 88 - Campo de deslocamento utilizando o modelo polinomial de segundo grau.	94
Figura 89 - Validação do modelo computacional selecionado.	94
Figura 90 - Ensaio com amplitude de 10% de deformação.	96
Figura 91 - Ensaio com amplitude de 15% de deformação.	96
Figura 92 - Ensaio com amplitude de 20% de deformação.	97
Figura 93 - Comparativo entre as três amplitudes de deformação.	97

Figura 94 - Perfil de carregamento.....	98
Figura 95 - Variação da tensão com o tempo.	99
Figura 96 - Curvas de tensão-deformação com intervalos de relaxação.	99
Figura 97 - Curvas de máximos e mínimos do ensaio de compressão.	100
Figura 98 - Ciclos de histerese no ensaio de fadiga em compressão.	101
Figura 99 - Campo de deslocamento no ensaio de compressão com a mola em escala real.	101
Figura 100 - Curvas força-deslocamento do ensaio e da simulação.	102
Figura 101 - Modelo computacional para determinação dos blocos de carregamento.	103
Figura 102 - Modelo em escala com amplitude máxima de deslocamento em compressão. ...	103
Figura 103 - Curva de máximos e mínimos do ensaio do protótipo.	104
Figura 104 - Montagem do módulo de compensação.....	105
Figura 105 - Módulo montado e calibrado com o conjunto ideal de molas.	105
Figura 106 - Força versus deslocamento das molas após a calibração do sistema.	106
Figura 107 - Perfil de carregamento axial no módulo de tração.	107
Figura 108 - Comportamento das molas durante o ensaio.....	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais elastômeros e suas aplicações.	15
Tabela 2 - Propriedades de alguns elastômeros comerciais (Mark and Erman 2005).....	19
Tabela 3 - Resistência dos elastômeros as condições do meio.	41
Tabela 4 - Perda de massa dos elastômeros de PU em comparação com o aço. (AirProducts 2008)	43
Tabela 5 - Matriz de ensaios da mola 1:5.	70
Tabela 6 - Erro dos modelos constitutivos hiperelásticos.	92

RESUMO

A intensa demanda por petróleo aliado às novas descobertas de poços em condições ainda inexploradas, propulsionam a pesquisa e desenvolvimento de novos componentes e materiais para a indústria petrolífera. A alta responsabilidade desses componentes, como *Risers* e *Bend Stiffners*, requer, que antes da sua aplicação em campo, seja realizada uma verificação através de ensaios experimentais, desenvolvidos com o objetivo de representar ao máximo todas as condições em campo. No presente trabalho, um sistema de compensação de deslocamento, com molas elastoméricas, foi desenvolvido para simular um comprimento de *Riser* retirado da amostra devido à inviabilidade de ensaio com o comprimento real. O material foi caracterizado através de ensaios mecânicos normalizados, ensaios específicos à aplicação e modelos em escala. Logo, um conjunto denominado módulo de compensação foi elaborado. O módulo de compensação apresenta a versatilidade da alteração de rigidez, podendo ser realizada através da mudança do número e/ou geometria das molas. Os resultados dos ensaios mostram-se dentro das tolerâncias especificadas, atingindo o objetivo do projeto.

Palavras-chave: Poliuretano, Elastômero, Propriedades Mecânicas, Histerese, Efeito Mullins.

ABSTRACT

The increasing demand for oil, combined with new wells discoveries in unexplored conditions, drives the research and development of new components and materials for the oil industry. The high responsibility of these components, such as Risers and Bend Stiffners, requires verification before field operation through experimental trials developed to achieve all conditions found during its useful life. In this thesis, a displacement compensation system, with elastomeric springs, was developed to simulate a short sample of riser due the inviability of testing the real length. The material was characterized by standard mechanical tests, specific tests for this application and scale models. Therefore, a group called compensation module was developed. The compensation module presents versatility in stiffness modification which can be achieved by changing the number and / or spring's geometry. The final test results are according to the expected, within the specified tolerances achieving the project goal.

Keywords: Polyurethane, Elastomer, Mechanical Properties, Hysteresis, Mullins Effect.

1 INTRODUÇÃO

A indústria do petróleo é indiscutivelmente um dos setores com maior percentual de aplicações utilizando novas tecnologias. O contínuo investimento em pesquisa e desenvolvimento tenta ultrapassar obstáculos naturais, ambientes corrosivos, alta pressão e intempéries fenomenológicas.

De acordo com a Agência Nacional do Petróleo (ANP), as reservas brasileiras concentram-se em ambiente marítimo, Figura 1. A necessidade de exploração marítima aliada aos intensos investimentos em pesquisa e desenvolvimento propulsionou a PETROBRAS como empresa líder mundial em tecnologia de exploração e produção de petróleo e gás *offshore*, principalmente em águas profundas e ultraprofundas.

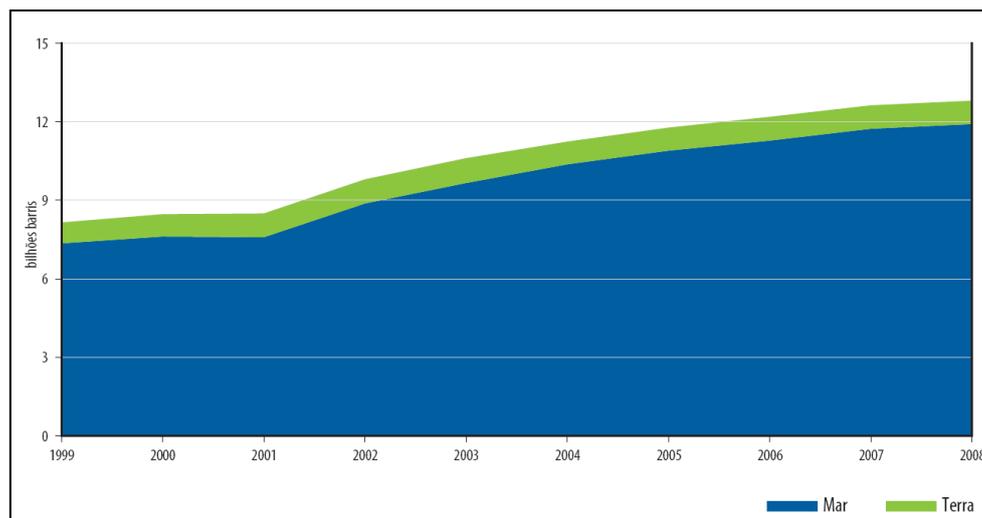


Figura 1 - Evolução das reservas provadas de petróleo, por localização (terra e mar) – 1999-2008 (ANP 2009).

O uso de plataformas fixas no leito do mar torna-se inviável ou praticamente impossível em profundidades superiores a 400m. Logo, estações flutuantes são imprescindíveis em regiões de "águas profundas" (profundidade entre 400m e 1000m) e "águas ultraprofundas" (maiores de 1000m), Figura 2.

Plataformas flutuantes estão sujeitas a ações da natureza, recebendo diversas solicitações dinâmicas causadas principalmente pelas ondas, correntes marítimas e vento.



Figura 2 - Plataformas flutuantes.

A ligação entre as plataformas flutuantes e o fundo do mar é realizada através de um sistema de tubulações, podendo ser rígida ou flexível. A elevada movimentação das unidades flutuantes, alta profundidade e a facilidade de lançamento e transporte favorecem a aplicação das linhas flexíveis na extração de petróleo em regiões profundas e ultraprofundas. Também conhecidos como *risers flexíveis*, esses dutos transportam petróleo do fundo do mar para as plataformas. São constituídos de geometria mista, composta por diversas camadas intercaladas de metal e polímero, as quais agregam alta rigidez axial e torcional, porém baixa rigidez à flexão, como visto na Figura 3.



Figura 3 - Representação das camadas de um *riser* flexível.

Como o fundo do mar é fixo e a plataforma oscilante, as maiores solicitações presentes são nas linhas flexíveis e encontram-se na região de engaste com a plataforma. Tendo o *riser* baixa rigidez à flexão, um enrijecimento local com intuito de evitar raios de curvaturas reduzidos é necessário para que não ocorra o dano da linha (Caire 2005).

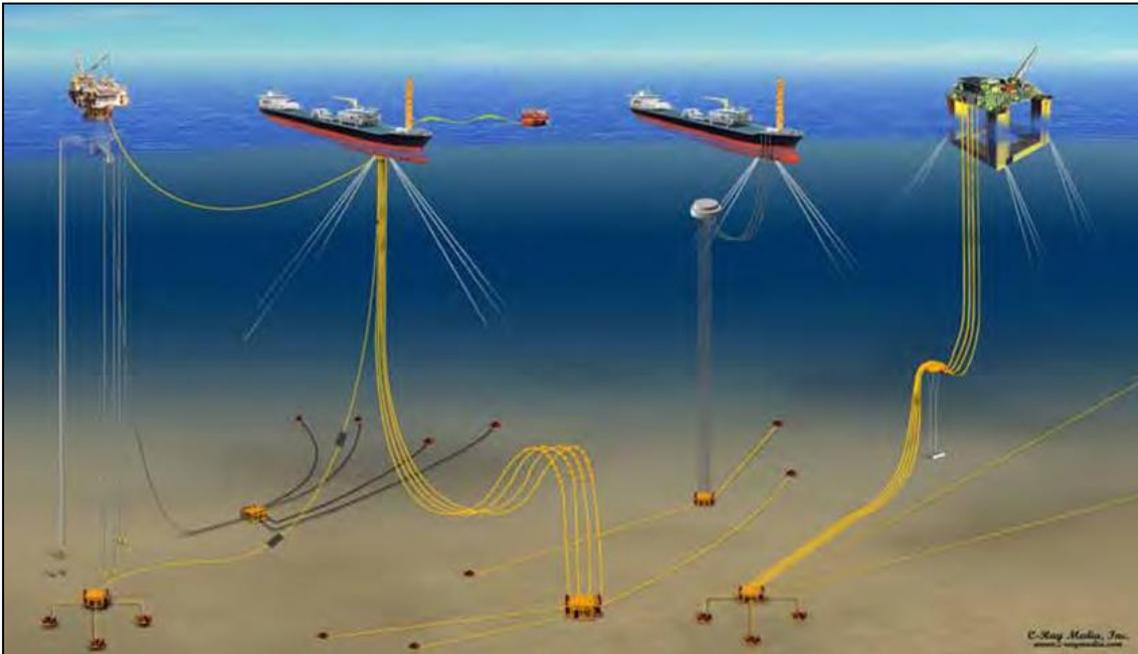


Figura 4 - Esquema representando a aplicação de linhas flexíveis e rígidas (Caire 2005).

A transição entre a conexão de engaste com a plataforma e a linha flexível deve ser realizada gradualmente de forma a garantir aos componentes vida útil suficiente para suportar os carregamentos variáveis sem riscos. A solução adotada atualmente emprega um componente cônico fabricado em poliuretano, denominado de *Bend Stiffener*. O poliuretano apresenta propriedades ideais à aplicação como flexibilidade, resistência mecânica, resistência à abrasão, fácil processamento, usinabilidade e imunidade à água do mar.

A falha de um *Bend Stiffener* comprometeria consideravelmente a integridade da linha flexível podendo gerar até mesmo a interrupção da produção, a qual seria restabelecida somente após a substituição do componente. Essas despesas não se restringem apenas ao volume de petróleo que deixaria de ser retirado, mas também inclui gastos com alteração de

logística, serviço de substituição de componentes, possível poluição ambiental, ou seja, somando prejuízos na ordem de milhões de dólares.



Figura 5 - Aplicação externa de *Bend Stiffeners*.

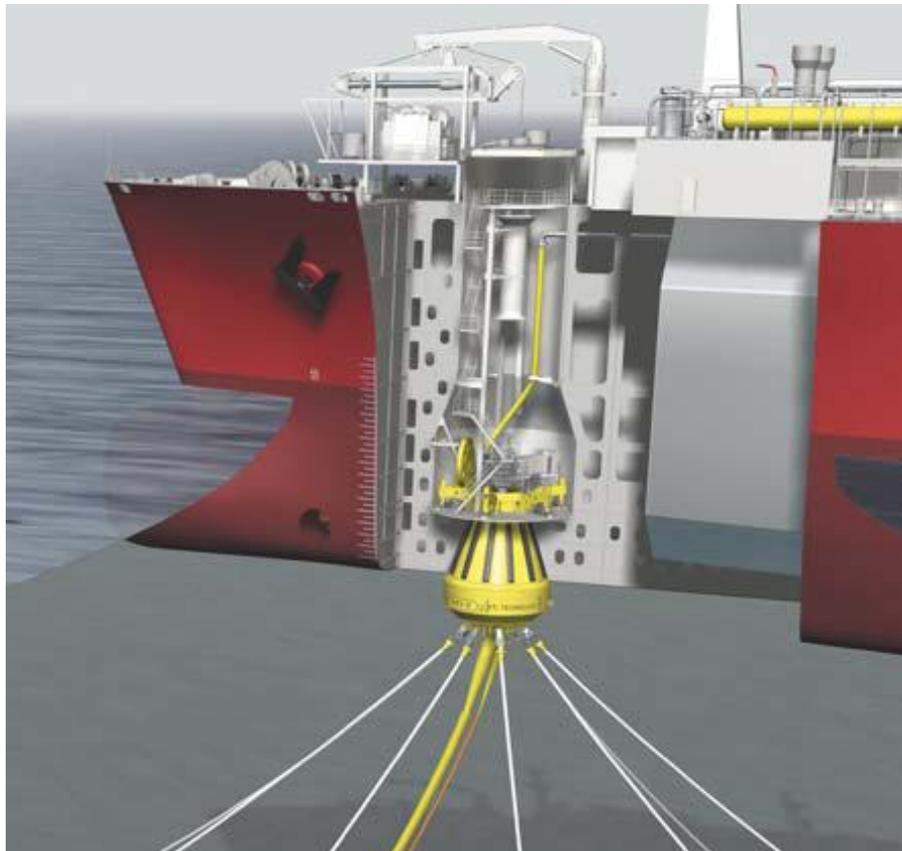


Figura 6 - Aplicação submersa de *Bend Stiffeners*.

1.1 MOTIVAÇÃO

Um novo conceito de *Bend Stiffener*, para aplicação submersa, foi proposta pela PETROBRAS. Assim, ensaios experimentais devem ser realizados para a qualificação do projeto. Dados retidos em campo e normas técnicas foram utilizados para ditar um procedimento de ensaio de qualificação.

Em parceria com o Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), uma máquina de ensaios foi desenvolvida para representar as condições de carregamento em campo e seguir o procedimento do ensaio desenvolvido.

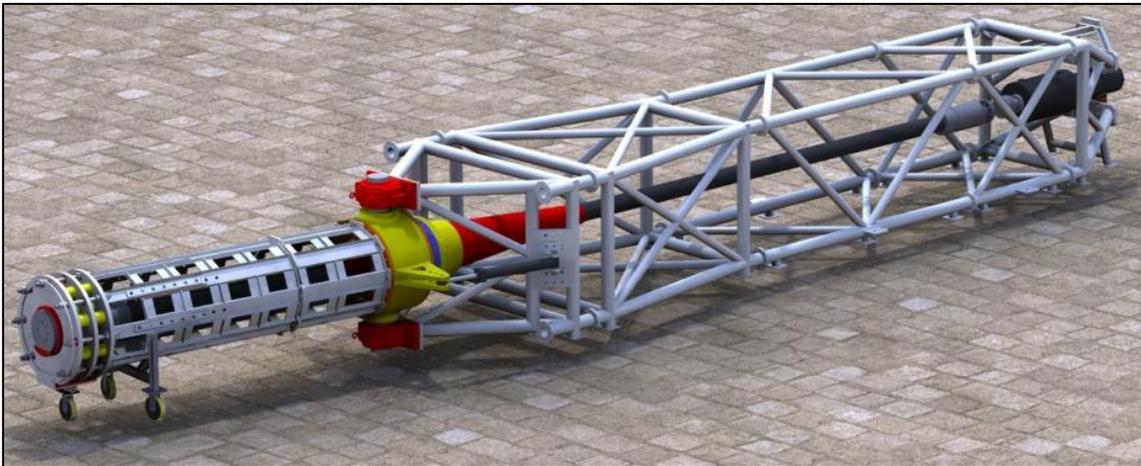


Figura 7 - Máquina de ensaios desenvolvida no LAMEF.

O projeto da máquina foi dividido em três módulos de operação: módulo de tração, módulo de flexão e módulo de compensação. O módulo de tração é composto por um atuador hidráulico servo controlado e pivotado sob mancais, este módulo tensiona a linha flexível representando o esforço gerado pelo peso da tubulação.

O módulo de flexão é composto por rolamentos, mancais e cilindros hidráulicos. Com o módulo de flexão é possível simular as movimentações da plataforma e/ou linha flexível devido à ação de correntes marítimas, ondas e vento. Neste módulo o *Bend Stiffener* é fixado em um componente com movimentação basculante controlada pela ação de cilindros hidráulicos.

O terceiro módulo, denominado módulo de compensação, foi o projeto que deu origem ao presente trabalho.

1.2 OBJETIVO

Bend Stiffeners submersos em unidades flutuantes de produção e armazenamento, FPSO (*Floating Production, Storage and Offloading*), são conectados a um sistema de fixação denominado de boca de sino. Esta fixação localiza-se, dependendo da plataforma, até 30m do engaste. A Figura 8 representa um esquema de fixação das linhas flexíveis em uma FPSO.

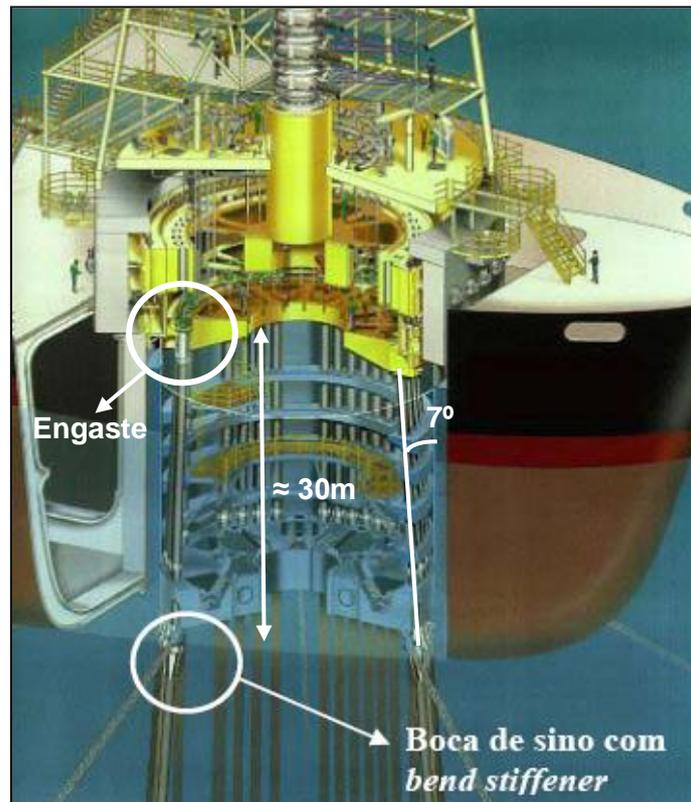


Figura 8 - *Bend Stiffeners* submersos em uma FPSO.

A real representação do sistema de fixação *Bend Stiffener*, boca de sino e engaste exigiria uma bancada de ensaios com grandes dimensões, elevando exageradamente os custos do ensaio. A alternativa, então, foi reduzir o comprimento da linha flexível na região entre o *Bend Stiffener* e o conector de terminação.

Correntes marítimas, movimentações da plataforma e o próprio peso da linha geram deslocamentos nos *risers*. Estes deslocamentos, por sua vez, geram uma movimentação relativa entre o *Bend Stiffener* e a linha, provocando desgaste dos componentes. Uma mera redução da linha flexível, para o ensaio, acarretaria na perda de representatividade tribológica da aplicação. Assim,

tornou-se necessário acrescentar à bancada de ensaios um sistema que representasse o deslocamento relativo à redução da linha conforme pode ser observado na Figura 9.

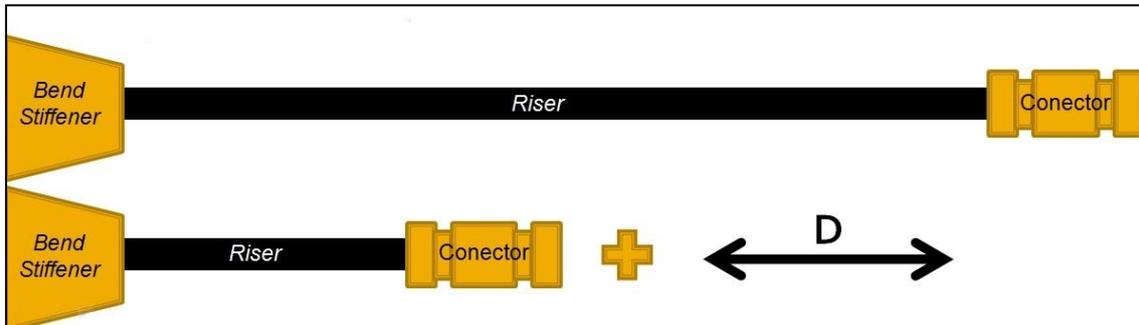


Figura 9 - Redução da linha flexível e deslocamento representativo "D".

O valor de "D" foi determinado através da correlação entre força e módulo elástico aparente do *riser*, sendo esse retirado através de ensaios experimentais. Como premissa inicial para o projeto adotou-se "D" linear e diretamente proporcional ao carregamento. Seu valor de projeto para dimensionamento do módulo de compensação é **50±10%mm** quando o carregamento de tração for igual a **1500kN**.

1.3 ANÁLISE DE MODELOS

Com a necessidade apontada, três modelos foram propostos para resolver o problema de compensação. Assim, um prévio estudo de viabilidade entre os projetos foi elaborado.

1.3.1 Modelo de molas em aço

Molas são componentes largamente utilizados em engenharia. Sua aplicação primordial é a absorção de energia mecânica através da deformação elástica. Convencionalmente são aplicadas em sistemas de amortecimento, dispositivos de retorno, entre outros.

Como vantagens do sistema de molas podemos citar a capacidade de absorver grandes deformações e o regime linear elástico do material. No entanto, as dimensões convencionais para molas helicoidais de compressão apresentam baixa rigidez para a aplicação. Assim, seria necessário um conjunto numeroso de molas para atender as premissas do projeto, 50mm em

1500KN. A alternativa seria customizar as molas helicoidais, o que acarretaria em um aumento exponencial nos custos, uma vez que o padrão comercial seria desatendido. Também se cogitou a idéia de molas prato, que apresentam alta rigidez, porém baixa deflexão. Novamente, seria necessário um conjunto abundante de molas prato em série para atender o deslocamento de 50 mm.

O projeto do módulo com molas de aço tornou-se inviável, pois tanto molas helicoidais quanto molas prato exigiriam um sistema amplo de acoplamento com a bancada de ensaios, atendendo o projeto somente quando customizadas e apresentam alto custo de fabricação.

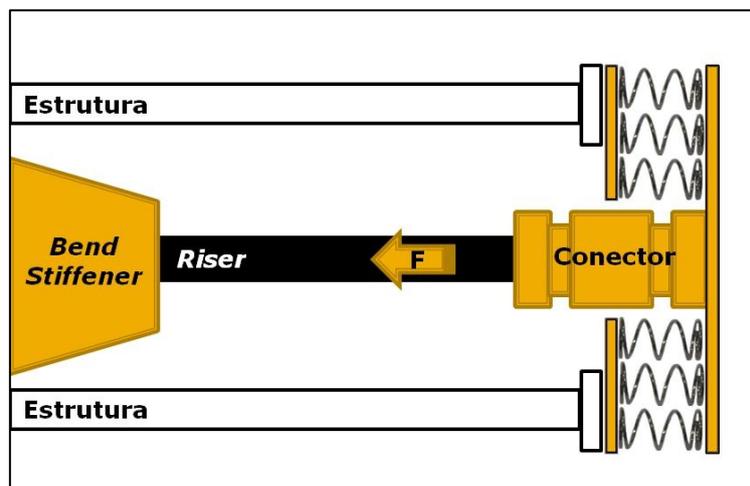


Figura 10 - Módulo de compensação com molas de aço.

1.3.2 Modelo de cilindros hidráulicos

A aplicação com cilindros hidráulicos para o módulo de compensação definitivamente seria o método de maior precisão, para alcançar os limites de deslocamento, entre os modelos estudados, uma vez que através do controle hidráulico os cilindros responderiam adequadamente à calibração. Outras vantagens do modelo seriam a fácil adaptação na bancada de ensaios e montagem compacta. Como desvantagem, o modelo apresentou o fato de que os dois cilindros aplicados teriam que, somados, igualar a capacidade de carga do atuador hidráulico do módulo de tração, ou seja, seriam cilindros robustos e de alto custo. Outro agravante foi a indisponibilidade de canais de controle no controlador hidráulico, pois nele já existiam controles de carga, deslocamento e ângulo.

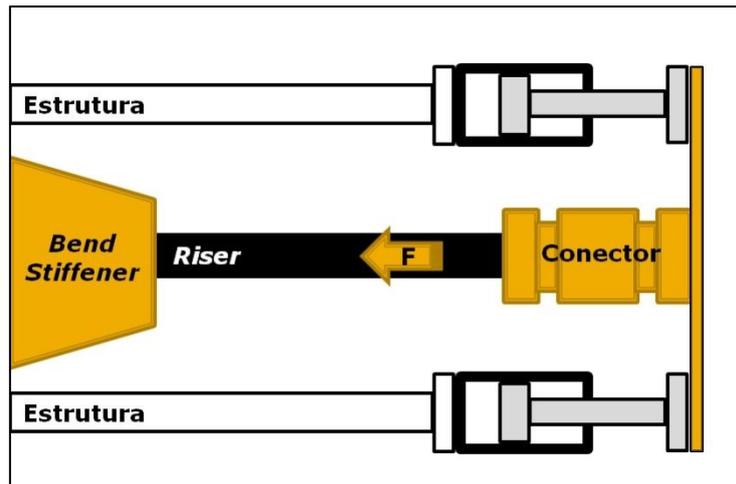


Figura 11 - Módulo de compensação com cilindros hidráulicos.

1.3.3 Modelo de molas poliméricas

O sistema de molas poliméricas foi o modelo de menor custo e de maior versatilidade. Com a simples alteração da geometria e número de molas pode-se variar a rigidez do conjunto. Outras vantagens como fácil acesso de materiais no mercado, fácil fabricação, montagem compacta e fácil adaptação na bancada de ensaios foram decisivas para a escolha deste modelo.

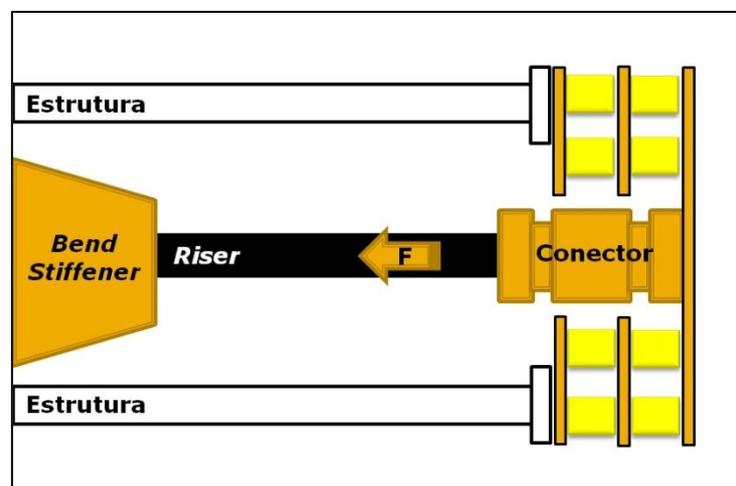


Figura 12 - Módulo de compensação com molas poliméricas.

O material polimérico selecionado para a aplicação foi o poliuretano. O elastômero de PU apresenta alta resistência mecânica, ótimo comportamento em fadiga, baixo atrito, diversidade de durezas e propriedades, bom comportamento sob grandes deformações, fácil processamento, uniformidade de propriedades, baixa densidade e razoável usinabilidade.

Obviamente, o modelo apresenta algumas desvantagens, como, por exemplo, a não-linearidade elástica e sensibilidade com a temperatura, à frequência de carregamento e reação com óleos e radiação ultravioleta (Qi and Boyce 2005). No entanto, essas desvantagens foram motivações para um estudo aprofundado do comportamento mecânico do material utilizado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ELASTÔMEROS

Os pioneiros no uso de elastômeros foram os índios brasileiros. Ao recolherem a seiva da árvore *Hevea brasiliensis*, o látex, os índios descobriam um fantástico material chamado borracha natural (NR). A NR ao reagir com enxofre à temperatura elevada forma reticulações modificando seu estado pastoso para um estado elástico (Hofmann 1989)

A borracha natural foi o único elastômero a ser utilizado comercialmente até 1927. Contudo o grande potencial técnico do material despertou interesse de cientistas em sintetizar materiais que se assemelhassem a mesma e, essa corrida desencadeou uma grande variedade de elastômeros sintéticos. Mesmo com a criação de diversos elastômeros, a borracha natural ficou referenciada como elastômero padrão, pois apresenta uma excelente combinação de propriedades desejadas em materiais elastoméricos (Cowie 1991).

A principal propriedade dos elastômeros, a qual seu nome deriva, é a habilidade que esses materiais possuem em se recuperar de grandes deformações, ou seja, estender e retornar a sua forma inicial. De acordo com a norma ASTM D1566-90, elastômeros podem ser definidos como materiais macromoleculares que podem retornar ao seu estado inicial de forma e dimensões após uma deformação gerada pela aplicação e retirada de carregamento externo (De, White et al. 2001).

Elastômeros são formados por longas cadeias moleculares que são obtidas através da polimerização. Essas moléculas podem ser arranjadas em três fases: amorfo; semi-Cristalino e cristalino. A Figura 13 demonstra as cadeias poliméricas em três fases físicas. Os elastômeros são normalmente categorizados como polímeros amorfos tendo um arranjo molecular em formato de corda, espalhadas randomicamente ao longo da estrutura.

A Figura 14 apresenta o comportamento mecânico sob tração dos polímeros em três fases físicas traçado no diagrama tensão-deformação. O ponto de ruptura é demarcado pelo símbolo (X).

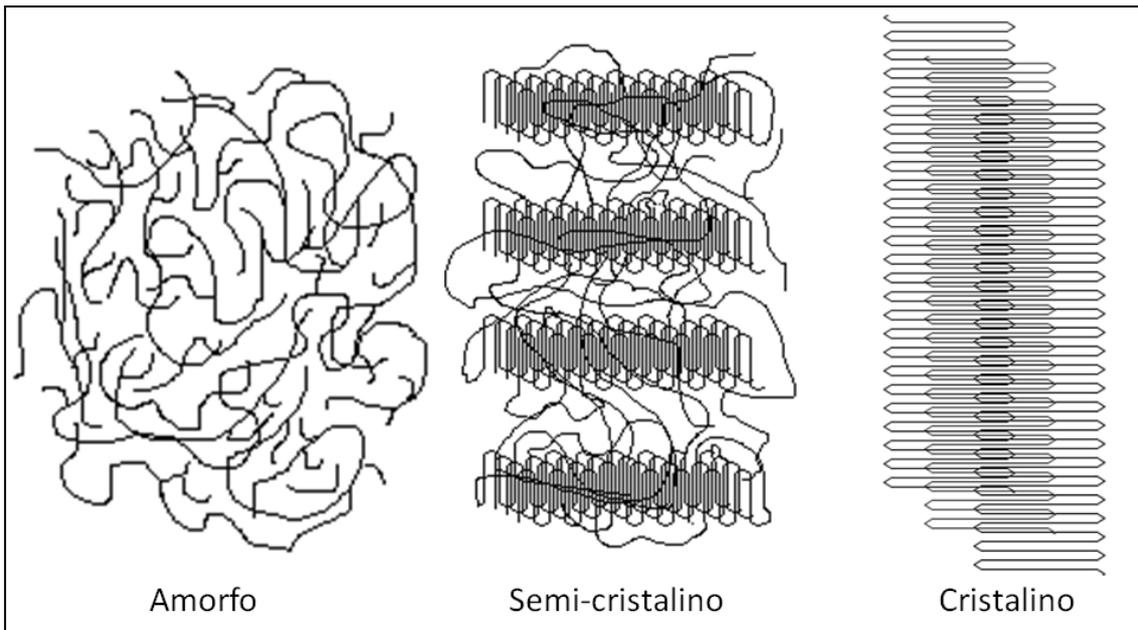


Figura 13 - Morfologia dos polímeros.

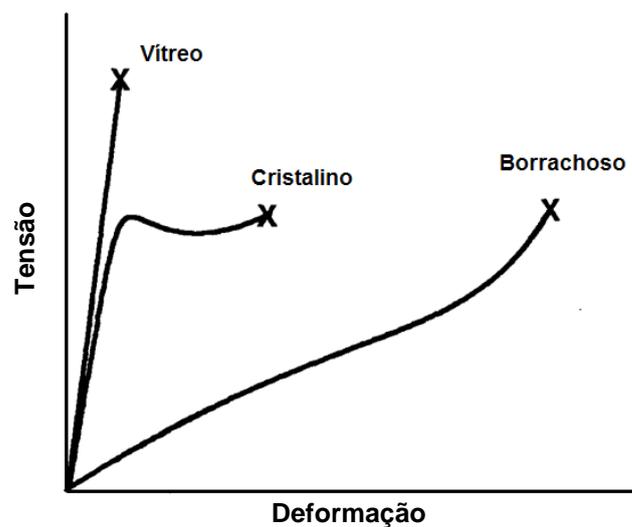


Figura 14 - Curvas tensão-deformação de tração dos polímeros nas três fases: vítreo, cristalino e borrachoso.

Os polímeros vítreos são duros e quebradiços. Já os polímeros cristalinos apresentam sucessivas etapas: deformação elástica, escoamento, deformação plástica, estrição, encruamento e fratura. As borrachas são macias, apresentando grande elasticidade e grande alongação (Gent and Campion 2001).

Materiais elastoméricos apresentam alto grau de flexibilidade e mobilidade. Tais características atribuem aos elastômeros grande capacidade de deformação. Alguns elastômeros podem ser alongados até 10 vezes seu

tamanho inicial e ainda recuperar-se totalmente após a retirada do carregamento, sem deformações permanentes ou tensões residuais. Quando sujeitos a tensão externa suas longas cadeias poliméricas podem se rearranjar rapidamente devido ao alto grau de mobilidade. Estas cadeias quando conectadas em formato de rede, comportam-se com características de sólido, onde apresentam mobilidade reduzida (Drobny 2007).

Elastômeros são formados por ligações cruzadas químicas ou físicas, conforme a Figura 15. O tratamento de elastômeros lineares ou ramificados utilizando agentes como enxofre, peróxidos ou outros agentes vulcanizadores produzem os elastômeros quimicamente ligados. As cadeias poliméricas são unidas entre si através de ligações primárias em pontos espalhados nas ramificações. As ligações químicas impedem as longas moléculas de fluir ou deslizar uma sobre as outras quando ocorre o aquecimento.

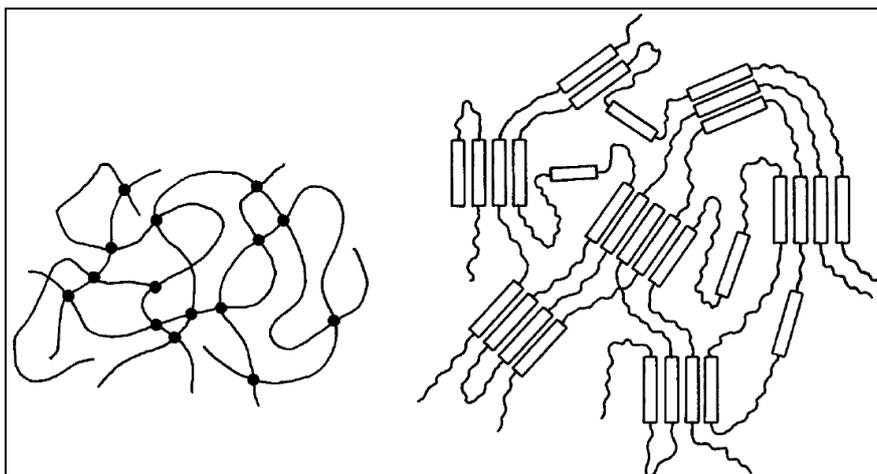


Figura 15 - Ilustração da estrutura dos elastômeros formados por ligações cruzadas químicas e físicas respectivamente.

Já as ligações físicas estão presentes nos blocos de copolímeros ou nos chamados elastômeros segmentados, que são macromoléculas compostas tanto de segmentos rígidos como flexíveis. Os segmentos rígidos são imiscíveis formando fases específicas, enquanto as partes flexíveis são regiões de estrutura amorfa apresentando baixa temperatura de transição vítrea. Os segmentos rígidos também podem ter estrutura amorfa, porém apresentando temperatura de transição vítrea elevada. Alternativamente os segmentos rígidos são alinhados em regiões cristalinas e, neste caso, podem apresentar

elevados pontos de fusão. Assim, os segmentos rígidos podem ser vistos como pontos de ligações físicas em nível de forças intermoleculares. Como resultado desta estrutura, os elastômeros segmentados apresentam características termoplásticas. Em temperaturas acima da transição vítrea dos segmentos rígidos amorfos (ou do ponto de fusão no caso dos segmentos rígidos cristalinos), passam ao estado fundido. Eles podem, portanto, serem processados utilizando técnicas convencionais de processamento de termoplásticos, como por exemplo, moldagem por injeção (Drobny 2007).

As propriedades elastoméricas do material são definidas pelos segmentos flexíveis, enquanto os segmentos rígidos estipulam a faixa de temperatura que o material poderá ser aplicado em serviço.

Sólidos cristalinos e materiais vítreos, no estado elástico, admitem pequenos deslocamentos entre seus átomos, na ordem de alguns angstroms. Grandes deformações provocam escoamento ou fratura nesses materiais. Podemos dizer que a resposta dos elastômeros são inteiramente intramoleculares, ou seja, as forças externas aplicadas são transmitidas ao longo das cadeias através das ligações nas suas extremidades, onde cada cadeia responde como uma mola individual aos carregamentos externos (Erhard 2006).

A Tabela 1 apresenta os principais tipos de elastômeros utilizados atualmente e suas respectivas aplicações nos diferentes campos da indústria mundial.

Tabela 1 - Principais elastômeros e suas aplicações (Erhard 2006).

	Elastômeros	Abreviação	Típico campo de aplicação
Elastômeros quimicamente ligados	Borracha Natural	NR	A utilização de borracha é generalizada, que abrange desde produtos domésticos aos industriais. Pneus e tubos são os maiores consumidores de borracha.
	Borracha de Butadieno Estireno	SBR	Pneus, bandas de recapagem de solados, mangueiras, correias, peças técnicas, artigos hospitalares e peças para indústria automobilística.
	Borracha de Polibutadieno	BR	Piso de pneus, solas, correias transportadoras e de transmissão, revestimento de rolos e outras aplicações que necessitem de um composto com resistência à reversão.
	Borracha de Poliisopreno	IR	O campo de aplicação da IR é semelhante ao da borracha natural
	Borracha de Policloropreno	CR	Têm como principal aplicação em roupas impermeáveis de mergulho. Conhecida popularmente como Neoprene®.
	Borracha Nitrilica	NBR	Borracha padrão para aplicações técnicas. Aplicação em vedações com O'rings.
	Poliuretano	PU	Testes de desgaste, peças de amortecimento, saltos de sapatos.
	Borracha Etileno-Propileno-Dieno	EPDM	Mancais, isolantes vibratórios, pára-choques.
	Borracha de Isobutileno Isopreno	IIR	Tubos de pneus, vedações, membros de amortecimento, revestimentos resistentes à abrasão em temperaturas de até 140 °C.
	Borracha de Silicone	Q	Artigos médicos, nas indústrias farmacêutica, aeronáutica, naval e automobilística.
Fluorelastomero	FR	Vedações com alta resistência ao calor e produtos químicos	
Elastômeros fisicamente ligados	Elastômero de etileno-propileno	EPR	Absorventes de energia, peças exteriores de automóveis, pára-choques.
	Elastômero estireno-butadieno-estireno	SBS	Equipamento para a indústria, solas, componentes para mistura de termoplásticos.
	Poliuretano termoplástico	TPU	Botas de esqui, proteção contra desgaste, amortecimento de membros
	Poliéteres ésters termoplásticos		Sistemas hidráulicos, pneumáticos, resistência ao óleo e ao calor
	Termoplásticos de poliamida		

2.2 SELEÇÃO DE MATERIAIS ELASTÔMEROS

2.2.1 Funcionalidade

Os elastômeros têm sua aplicabilidade em diversas áreas cumprindo funções variadas como mancais, absorção de energia dinâmica, amortecedores e reservatório de fluídos.

Uma imensa gama de materiais elastômeros está disponível para comercialização. Por um lado esta abundância oferece a oportunidade de se obter um material perfeitamente apropriado para a aplicação, mas por outro lado requer uma atenção especial por parte dos projetistas para a seleção do tipo de elastômero a ser utilizado. Os elastômeros não apresentam apenas variações em custo, mas também em suas propriedades físicas e químicas, como polaridade, estabilidade térmica, propriedades a baixa temperatura, propriedades dinâmicas, adesão, dureza e resistência. A adequada seleção dos materiais elastômeros deve englobar a análise química do polímero e suas específicas propriedades físicas requeridas para a aplicação (Harper 2004).

2.2.2 Confiabilidade e Durabilidade

Confiabilidade é a garantia que temos que o material selecionado cumprirá as funções designadas no projeto. Fatores ambientais como alta e baixa temperatura, exposição a fluídos de diversas polaridades, esforços físicos devido a impactos e vibrações, oxigênio, ozônio (derivado da atmosfera ou componentes elétricos), radiação ultravioleta, e campos elétricos, devem ser observados, pois podem influenciar na função confiabilidade/durabilidade do material escolhido.

Durabilidade é medida através do desempenho do material, dentro dos limites de confiabilidade, em um espaço de tempo. Muitos componentes elastoméricos, como os aplicados em veículos, são vitais para o funcionamento do automóvel. Em muitos casos estes componentes podem estar inacessíveis e mesmo assim exercer importante função para a vida útil do veículo. Para estes casos o estudo da durabilidade e confiabilidade deve ser ainda mais aprofundado.

Normalmente a falha em elastômeros e plásticos é resultado de uma deterioração química do polímero orgânico, freqüentemente causada pela oxidação. Os polímeros podem reagir com o ozônio, com radicais livres gerados pela presença de luz ultravioleta, ou com oxigênio em elevadas temperaturas ou ainda com o ar aprisionado durante a mistura para fabricação do polímero. Em muitos polímeros o ataque químico pode danificar as cadeias moleculares por três formas distintas, rompendo as cadeias poliméricas, diminuindo o peso molecular ou, deteriorando as propriedades mecânicas. Se duas ou mais cadeias são unidas, um acúmulo de ligações cruzadas pode causar fragilização, encolhimento e fratura. Os elastômeros ainda podem falhar através do ataque nas ligações cruzadas em uma reação, conhecida como reversão ou desvulcanização, causando a perda das propriedades elastoméricas (Harper 2004).

2.2.3 Considerações de segurança

Certos componentes exercem funções vitais, não somente com relação ao desempenho, mas também quanto à segurança. Estas peças devem ser fabricadas com materiais que não somente resistam, mas continuem funcionando com total confiabilidade durante toda a vida. Exemplos destas aplicações podem ser vistos em mangueiras de freio automobilístico, suspensão, componentes aeronáuticos, aplicações *offshore*. Considerações de segurança e efeitos reguladores são extremamente significantes, pois sérias conseqüências podem estar envolvidas em caso de falha destes componentes. Ao trabalhar com elastômeros os projetistas devem estar completamente cientes das considerações e regulamentos necessários para a qualificação do componente em uso (Bhowmick and Stephens 2001).

2.2.4 Custo

Evidentemente diversas opções de elastômeros poderão estar viáveis com capacidade funcional, confiabilidade, durabilidade e segurança semelhantes. Então, após estes critérios o custo entra como fator decisivo na seleção do elastômero. Componentes das formulações e, processos de fabricação do material são fatores que afetam significativamente o custo final

do componente. A Figura 16 abaixo mostra um comparativo de custo e desempenho entre os principais elastômeros (Kear 2003).

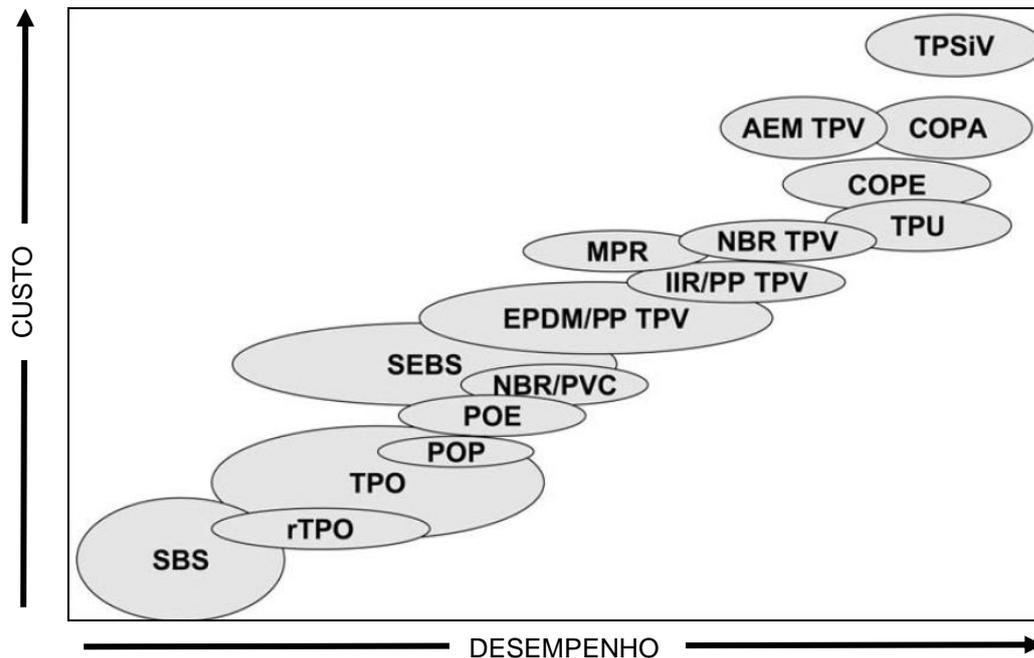


Figura 16 - Custo e desempenho dos principais elastômeros comerciais.

2.3 ENGENHARIA E ELASTÔMEROS

Os elastômeros combinam um baixo módulo de Young com um módulo de compressão muitas vezes maior. Ainda apresentam a capacidade de se deformar até 600% antes da falha. Grandes deformações podem ocorrer devido à estrutura dos elastômeros serem formadas por longas cadeias, as quais são agrupadas formando um emaranhado no formato de rede. Quando as solicitações são impostas a rede modifica-se acomodando suavemente as deformações, diferentemente como ocorre nos sólidos rígidos onde as deformações concentram-se nas junções moleculares. Borrachas são altamente extensíveis quando sujeitas a modos de deformação onde não sejam restringidas hidrosticamente, mas por outro lado quando sob compressão hidrostática as cadeias moleculares se aglomeram restringindo as deformações. A Tabela 2 apresenta propriedades comumente utilizadas de alguns polímeros elastômeros comerciais.

Tabela 2 - Propriedades de alguns elastômeros comerciais (Mark and Erman 2005).

Material	Custo Relativo	Tensão de Ruptura (MPa)	Deformação máxima (%)	Temperatura de serviço (°C)	Dureza (ShoreA)
SBR	1	15	500	Alto	35 a 100
Borracha Natural	1	30	500	Alto	30 a 100
Silicone	1.2	5	150	Alto	40 a 100
Polietileno	1	10	Alto	-10 a 50	100
Fluorelastomero	1.5	10	200	Alto	50 a 90
SBS	2	25	800	-20 a 80	50 a 90
Polipropileno	1.5	20	500	0 a 110	70
Poliuretano	6	50	600	-20 a 80	50 a 100
Copoliester	7	40	600	-40 a 150	>100
Ionômero	5	15	500	-20 a 100	50 a 90

A borracha quando não tratada apresenta certa instabilidade e tende a fluir sob ação de esforços mesmo a temperatura ambiente. Quando designada para fabricação de componentes de engenharia, a borracha deve passar pelo processo de vulcanização, processo que promove ligações cruzadas entre as cadeias melhorando as propriedades mecânicas do material. O processo de vulcanização envolve a mistura química com o enxofre, elemento responsável pela ativação das ligações cruzadas. Como resultado do processo de vulcanização, tem-se um material mais estável em uma grande faixa de temperatura, variando aproximadamente entre -60 a +200 °C, sendo que alguns tipos especiais de elastômeros podem atuar em temperaturas ainda mais altas. O módulo de Young de uma borracha vulcanizada fica entre 1 e 10MPa. A sua tensão de ruptura usualmente atinge valores entre 10 e 50MPa, para alongamentos de até 1000%. Muitos tipos de elastômeros utilizados em engenharia incorporam preenchimentos (cargas) de “negro de carbono ou negro de fumo”. As cargas podem melhorar a resistência ao entalhe, resistência a abrasão, resistência a tração e aumentam o módulo de elasticidade e, normalmente são acompanhadas por um aumento da histerese e fluência do material. O grau mais fino do “negro de fumo” é particularmente mais eficaz como carga de reforço. Cargas ainda podem ser “inertes” tendo um pequeno efeito na resistência e um moderado efeito no módulo, na histerese e na fluência (De, White et al. 2001).

2.4 .COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS ELASTÔMEROS SOB DEFORMAÇÃO

O entendimento da deformação mecânica dos elastômeros não é um assunto trivial. Variáveis de carregamento, modo de deformação, número de ciclos, relaxação, taxa de deformação e temperatura afetam sensivelmente o comportamento global destes materiais. Neste contexto, faz-se necessário uma revisão pertinente à deformação dos materiais elastoméricos.

2.4.1 Comportamento típico dos elastômeros

Torna-se impraticável ou até mesmo impossível caracterizar materiais elastoméricos sob condições de carregamento idênticas as experimentadas durante a operação. No entanto, com a aplicação de alguns simples testes mecânicos chega-se a uma boa aproximação. Há pelo menos quatro ensaios normalizados que são utilizados freqüentemente na caracterização dos elastômeros:

- Ensaio uniaxial
- Ensaio biaxial
- Ensaio de Cisalhamento Puro
- Ensaio Volumétrico

Normalmente os resultados são combinados para a caracterização do comportamento mecânico dos elastômeros.

Conforme a Figura 17, os alongamentos principais, λ_1 , λ_2 e λ_3 , são a razão entre o comprimento final e o inicial nas direções principais da amostra do material. Os alongamentos podem ser relacionados com as deformações principais, ϵ , por:

$$\lambda_i = 1 + \epsilon_i, i = 1, 2, 3 \quad (2.1)$$

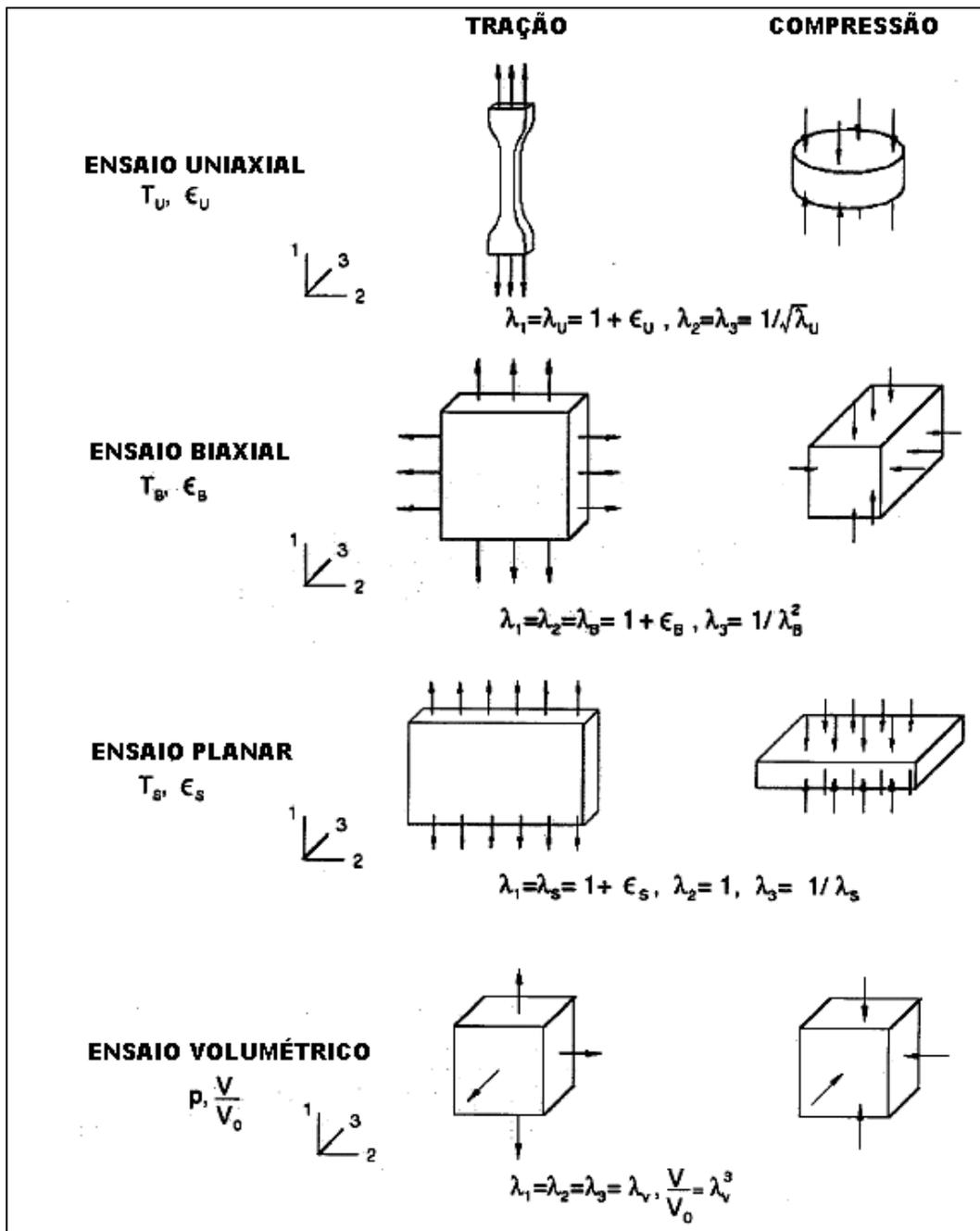


Figura 17 - Esquema dos principais ensaios aplicados na caracterização dos materiais elastômeros (Hibbitt, Karlsson et al. 2008)

Nos três primeiros testes, o material exibe comportamento hiperelástico, ou seja, manifesta grande deformação elástica, muito superior aos materiais convencionais. Ao aplicar um carregamento, os elastômeros mostram uma grande deformação elástica não-linear, que os diferencia dos materiais tradicionais de engenharia, os quais obedecem à lei de Hooke. A Figura 18 demonstra a relação tensão-deformação de um material elastômero tensionado em três ensaios distintos, uniaxial, biaxial e planar.

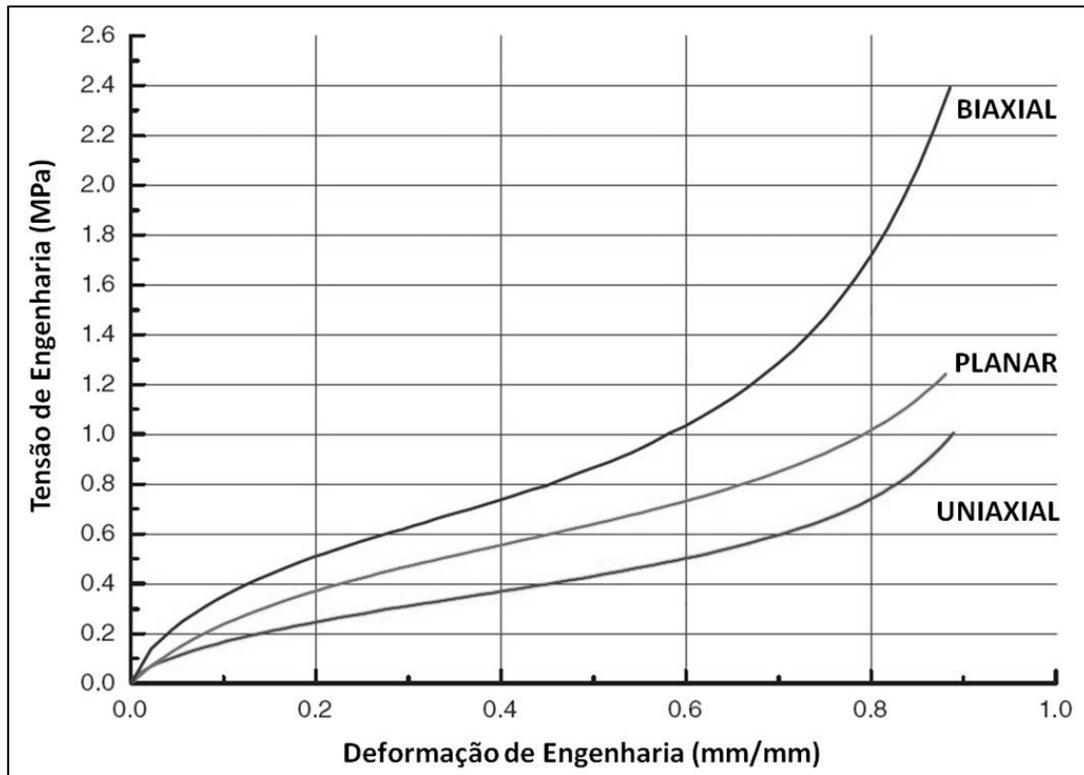


Figura 18 - Comportamento comum dos elastômeros sob tensão em três ensaios, uniaxial, biaxial e planar (Miller(a) 2000).

2.4.2 Efeitos das variáveis de carregamento e do meio

Conforme já discutido, os elastômeros apresentam sensibilidade a diversas variáveis de carregamento. Nesta seção alguns desses efeitos, relevantes ao estudo proposto, são apresentados.

2.4.2.1 Dependência do tempo

O comportamento tensão-deformação dos elastômeros é extremamente dependente do tempo. O fenômeno de dependência do tempo observado em inúmeros trabalhos inclui: (1) a dependência da taxa de aplicação do carregamento, onde a tensão requerida para alcançar uma dada deformação aumenta com a elevação da taxa de deformação; (2) a relaxação, onde a tensão decresce durante o carregamento e cresce durante a descarga e, com o passar do tempo tende a alcançar um valor de equilíbrio; (3) a histerese durante os carregamentos cíclicos, onde a magnitude dos laços de histerese depende da taxa de deformação (Bergstrom and Boyce 2001).

A Figura 19 mostra a compressão uniaxial de um típico elastômero em três taxas de deformação distintas, evidenciando a condição (1). Durante o carregamento, quanto maior a taxa de deformação maior é a tensão alcançada. Já durante o descarregamento as tensões são praticamente idênticas, fato que sugere menor dependência da taxa de deformação (Bergstrom and Boyce 1998).

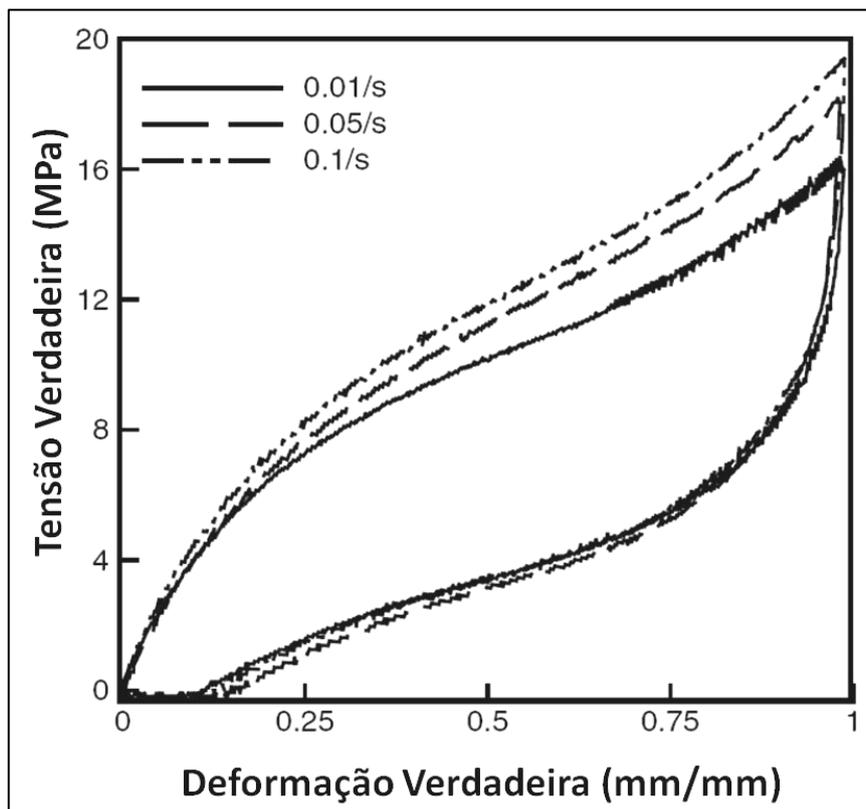


Figura 19 - Compressão uniaxial em três diferentes taxas de deformação (Qi and Boyce 2005).

Quanto à condição (2), a Figura 20 ilustra o experimento de compressão uniaxial utilizado para visualização do comportamento de relaxação. A taxa de deformação constante é interrompida por segmentos de relaxamento durante o carregamento e o descarregamento. Os resultados do teste mostram que a tensão diminui durante os segmentos de relaxamento no carregamento, e de fato aumenta, durante os segmentos de relaxamento na descarga. O ponto médio do relaxamento sob carregamento e do relaxamento sob descarga define a curva de equilíbrio do material (Bergstrom and Boyce 1998).

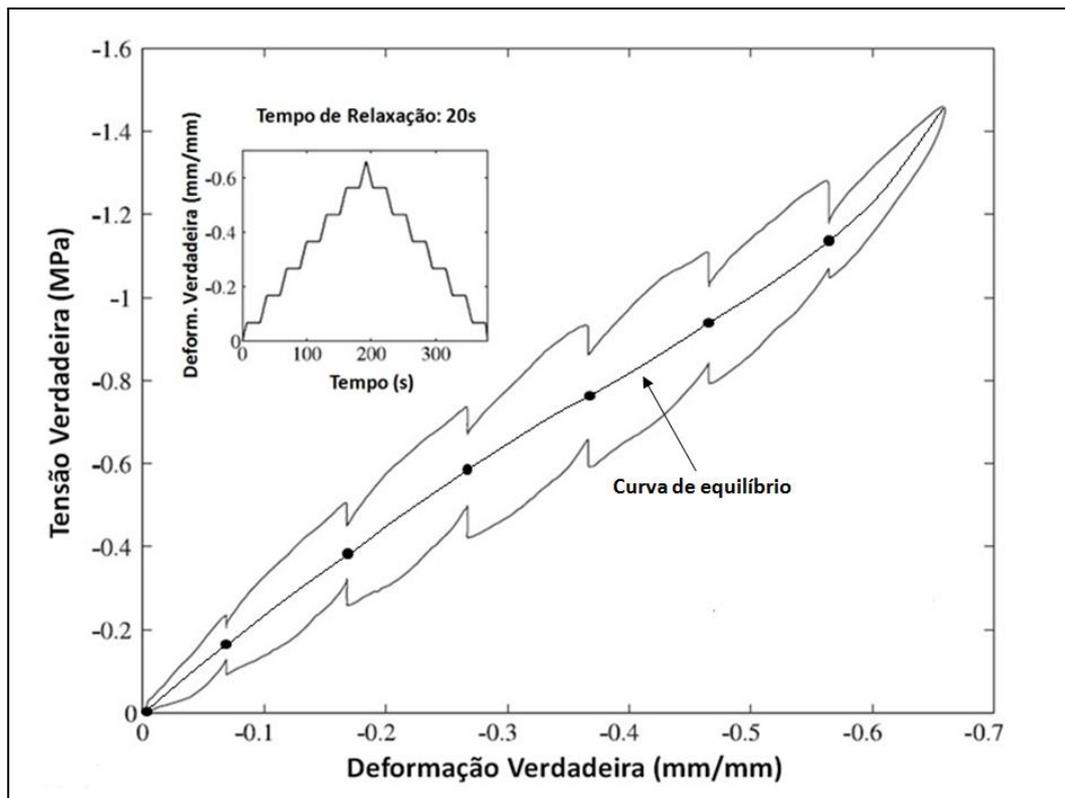


Figura 20 - Comportamento tensão-deformação com tempo de relaxação de 20s (Bergstrom and Boyce 2000).

2.4.2.2 Comportamento multiciclo

Durante o carregamento cíclico, os elastômeros apresentam comportamento peculiar. Quando sujeitos a grandes deformações, laços de histerese aparecem durante a retirada do carregamento, como pode ser visualizado na Figura 21. Já durante a ciclagem ocorre a perda de rigidez, conhecida como amolecimento, sendo caracterizado por uma queda de tensão no descarregamento comparado com a tensão no carregamento para mesma deformação. Essas características típicas destes materiais são descritas como efeito Mullins.

Mullins (Mullins and Tobin 1965), assume em seu modelo que o caminho seguido no recarregamento é o mesmo caminho de descarregamento desde que a deformação máxima do primeiro ciclo não seja alcançada (Cantournet, Desmorat et al. 2009), como pode ser visualizado na Figura 22.

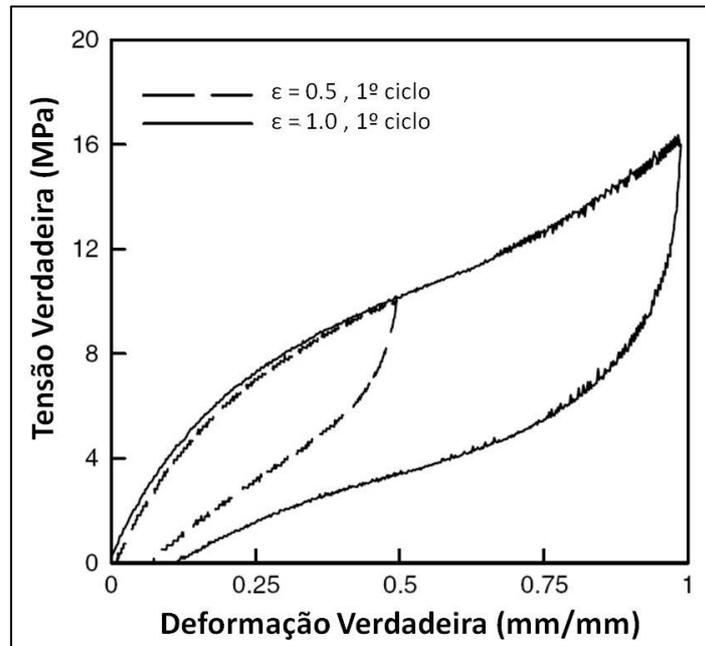


Figura 21 - Laços de histerese (Qi and Boyce 2005).

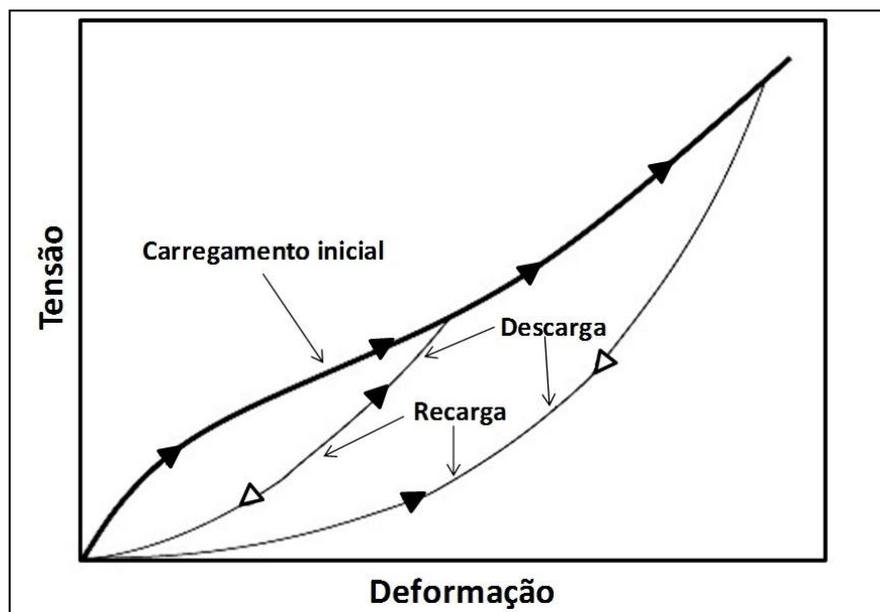


Figura 22 - Comportamento idealizado do efeito Mullins.

Entretanto, os materiais elastoméricos apresentam um complexo comportamento inelástico. Em testes cíclicos em que a amplitude de deslocamento é constante observa-se uma abrupta queda de tensão nos primeiros ciclos, normalmente até o décimo ciclo. Após a queda inicial, um estado estacionário com tensão constante vai lentamente sendo determinado. Com o equilíbrio ocorre então a estabilização dos laços de histerese. Na Figura 23 observamos três ciclos sucessivos com deformação constante. Nota-se assim, a grande queda de tensão devido à ciclagem.

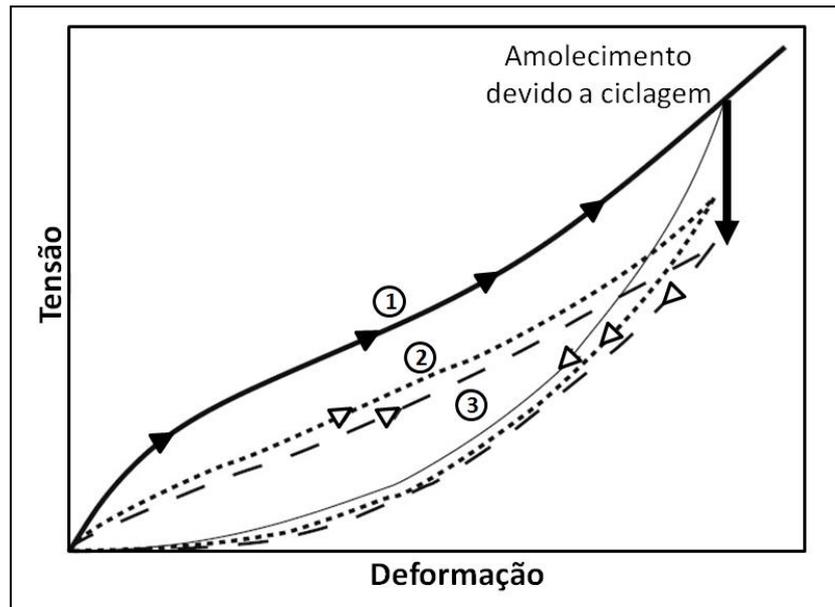


Figura 23 - Comportamento real dos elastômeros.

Não há uma explicação unânime para as causas físicas do efeito Mullins para materiais elastoméricos. Mullins e Tobin (Mullins and Tobin 1965) assumem que o material consiste de duas fases, uma macia e outra dura. Durante a deformação, as regiões rígidas são quebradas e transformadas em regiões moles. No entanto, não fornecem interpretações físicas para o raciocínio apresentado. A justificativa física para o modelo de duas fases proposto por Mullins foi discutido por Johnson e Beatty (Johnson and Beatty 1993). Eles sugerem a interpretação da fase dura como um conglomerado de cadeias moleculares constituído por cadeias curtas, atreladas ou agrupadas por forças intermoleculares. Quando o material é deformado, as cadeias são extraídas do grupo aglomerado, então se transformam em regiões moles. A Figura 24 mostra um esquema da configuração da estrutura molecular dos elastômeros referente à hipótese sugerida na explicação do efeito Mullins.

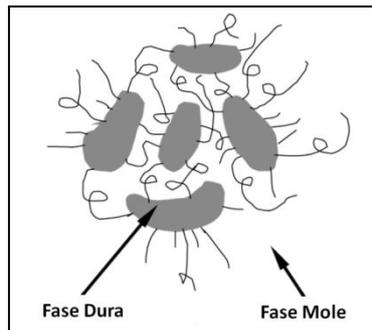


Figura 24 - Configuração da estrutura molecular dos elastômeros pela teoria de Mullins e Tobin.

2.4.2.3 Efeito da Temperatura

A temperatura afeta diretamente o movimento molecular, e conseqüentemente interfere no comportamento mecânico dos elastômeros. No caso dos elastômeros, existe uma faixa de temperatura que vai da chamada temperatura de transição dúctil-frágil (T_d) até a temperatura de transição vítrea (T_v) onde a variação de resistência é acentuada. Para temperaturas abaixo da T_d , o material se comporta de maneira frágil e, a partir de T_v , o polímero passa a apresentar características elastoméricas. Para a maioria dos elastômeros a temperatura de transição vítrea está bem abaixo da temperatura ambiente (Marczak, Hoss et al. 2006). O efeito da temperatura no comportamento mecânico dos elastômeros é demonstrado na Figura 25.

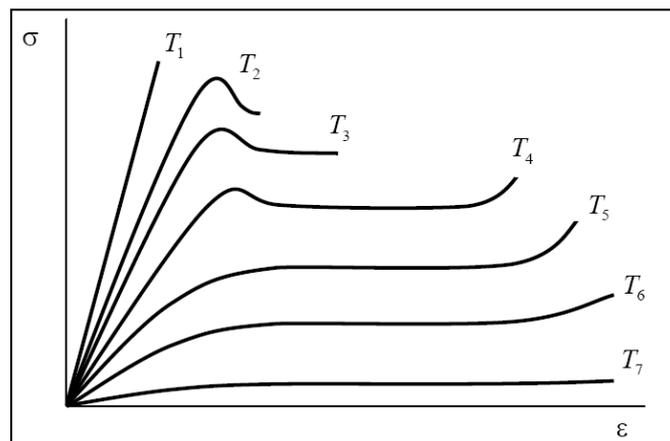


Figura 25 - Variação do comportamento mecânico dos elastômeros com o aumento de temperatura ($T_1 < T_7$) (Marczak, Hoss et al. 2006).

De acordo com os dados do ensaio de compressão uniaxial de Lion, (Lion 1997), apresentados na Figura 26, para um tipo especial de borracha o

aumento de temperatura não afeta significativamente a rigidez, no entanto percebe-se uma ligeira queda de histerese com o aumento de temperatura.

Miller realizou um estudo onde o mesmo carregamento compressivo e uniaxial é imposto em amostras elastoméricas a diferentes temperaturas, como apresentado na Figura 27. Nota-se que a 23°C o material apresenta resposta típica de um elastômero convencional. No entanto, a -40°C, o comportamento deste material passa a apresentar uma característica frágil ao invés de dútil, não demonstrando recuperação após deformações plásticas, comumente observado no comportamento mecânico dos elastômeros (Miller(b) 2000).

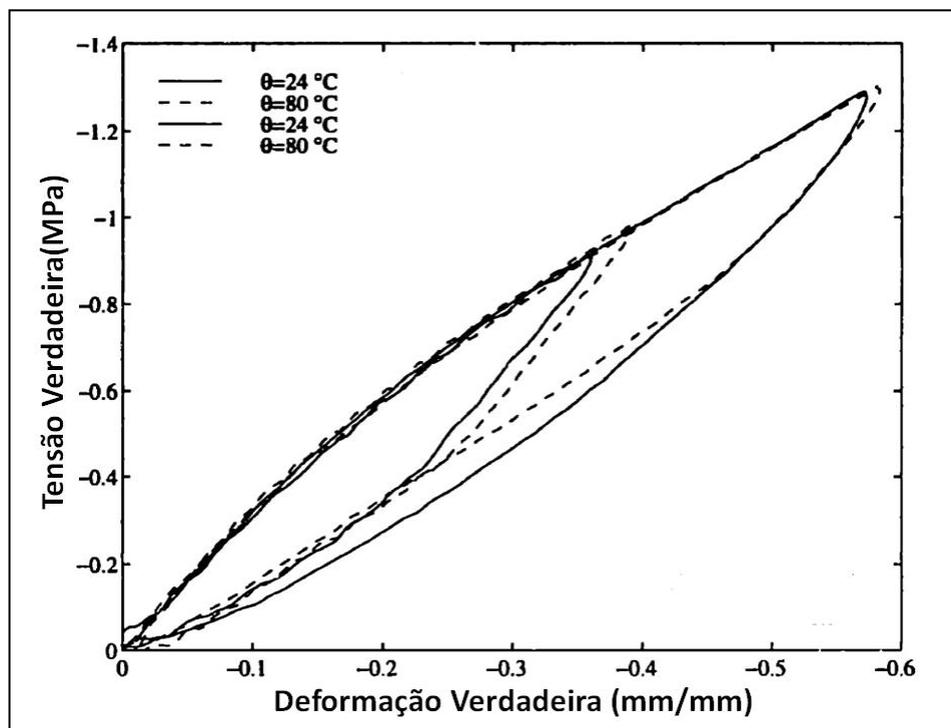


Figura 26 - Comportamento tensão-deformação de um ensaio de compressão uniaxial em diferentes temperaturas (Miller(b) 2000).

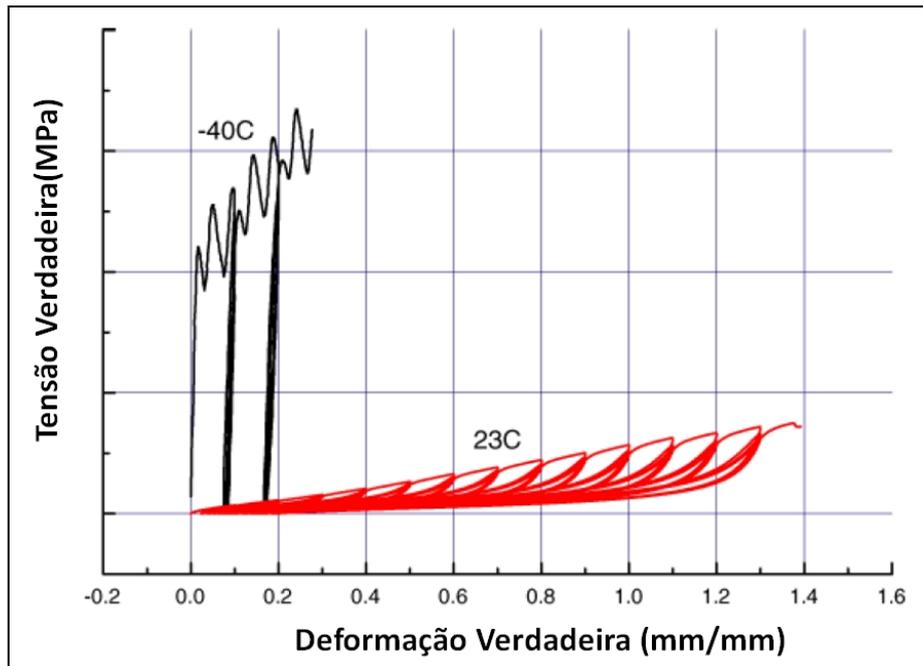


Figura 27 - Compressão uniaxial a diferentes temperaturas (Miller(b) 2000).

2.5 ELASTÔMEROS DE POLIURETANO

Em 1937, o professor Otto Bayer descreveu os princípios da composição química do poliuretano. O poliuretano apresenta atualmente um vasto campo de aplicações: tecidos especiais para roupas de esporte, como os comerciais Elastano e Lycra, peças automobilísticas, revestimentos, rodas, peças de engenharia, vedações, indústria do calçado, espumas, móveis e roupas de segurança (Ciesielski 1999).

Os elastômeros de poliuretanos podem ser classificados como “plásticos” de engenharia por apresentar ótimas propriedades mecânicas como resistência à tração e compressão, assim também ao entalhe, à fadiga, à abrasão e ao cisalhamento. Tais propriedades viabilizam a aplicação deste material em diversas variedades de peças técnicas e revestimentos.

A cadeia macromolecular segmentada e a morfologia de domínios de duas fases, Figura 28, são responsáveis pelas propriedades físicas, que podem ser alteradas pela variação das matérias-primas escolhidas. Modificações podem ser obtidas pela incorporação de fibras, e os produtos reforçados com fibra de vidro atingem alta resistência mecânica, fazendo com que os

A formação de um elastômero de poliuretano com propriedades mecânicas aceitáveis requer a reação de um diisocianato com diol de baixo e de alto peso molecular. As pequenas cadeias de diol formam os segmentos rígidos, já os flexíveis são constituídos pelas longas cadeias de diol juntamente com os diisocianatos. O montante relativo de cadeias pequenas de diol influencia diretamente as propriedades relacionadas com a dureza do elastômero. Basicamente não há ligações químicas entre as cadeias lineares. Entretanto, a interação dos segmentos rígidos entre cadeias acarreta a formação de fortes pontes de hidrogênio que podem ser consideradas como ligações cruzadas “físicas” (Bhowmick and Stephens 2001).

2.5.2 Matérias-prima

2.5.2.1 Isocianatos

Os isocianatos mais importantes utilizados na fabricação do poliuretano são os diisocianatos, contendo dois grupos de isocianato por molécula. Estes dois grupos funcionais unem-se (por reação química) com outras duas moléculas (poliol ou extensor de cadeia) para formar uma cadeia linear. Quando a funcionalidade é maior do que dois, uma região livre é formada entre as moléculas, levando à formação de rede ou ligações cruzadas

Os diisocianatos podem ser aromáticos ou alifáticos, representados por 4,4'-diisocianato de difenilmetano (MDI) e MDI hidrogenado (HMDI). Outro diisocianato muito presente na indústria é o tolueno diisocianato (TDI), e, assim como o MDI, apresenta natureza aromática. Na Figura 30 abaixo, está representada a estrutura química dos três diisocianatos citados.

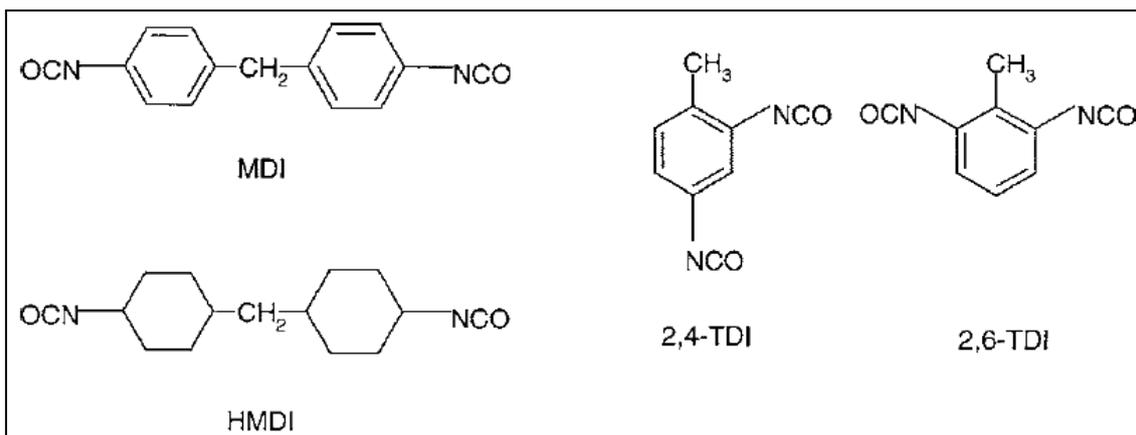


Figura 30 - Estrutura química dos diisocianatos MDI, HMDI e TDI.

Com a estrutura dos diisocianatos composta por anéis aromáticos e as fortes interações intermoleculares, como as pontes de hidrogênios, entre os grupos de uretano formada após as reações do isocianato com extensores de cadeia, os segmentos formados são mais rígidos que os constituídos por polioli. Sendo assim, os segmentos contendo isocianato e extensores de cadeia são denominados de segmentos rígidos (Vermette 2001).

2.5.2.2 Polióis

Os polióis convencionais aplicados na indústria de poliuretano são geralmente poliéter (com estrutura de repetição $-R-O-R'-$) ou poliéster (de estrutura $-R-COO-R'-$) em cadeia com terminações em grupos hidroxila. Ao contrário dos compostos de diisocianato e extensores de cadeia, os polióis são compostos oligômeros com peso molecular variando entre centenas a milhares de unidades. Essa variação de peso molecular influencia no seu estado físico, podendo ser líquido ou sólido a temperatura ambiente. Com baixas interações intermoleculares e estrutura alifática, as moléculas de polioli apresentam facilidade para girar e flexionar e são, portanto, materiais macios. Por consequência, uma sequência de polioli em um bloco do copolímero de poliuretano é denominada como segmento flexível ou domínio flexível (Vermette 2001). A estrutura química de quatro pólios convencionais é apresentada na Figura 31.

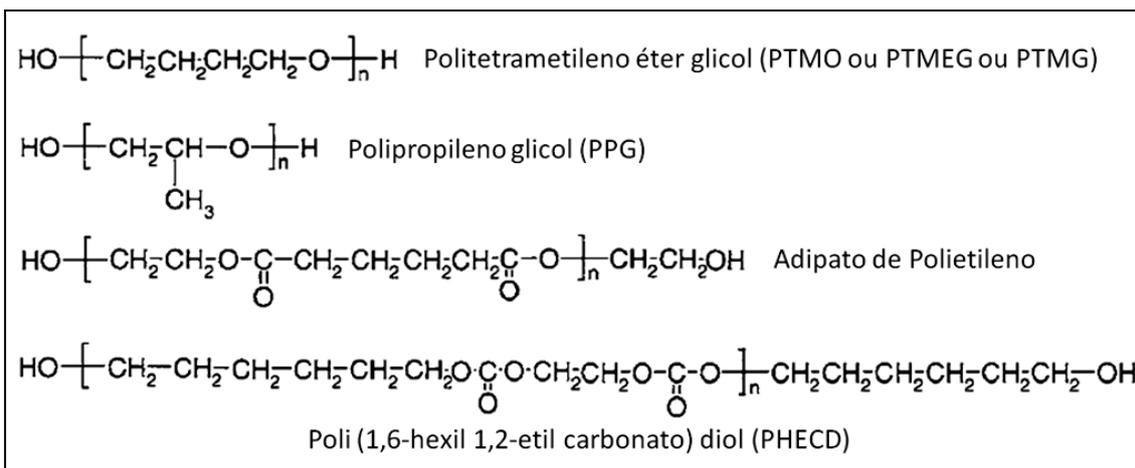


Figura 31 – Macro glicóis utilizados na síntese do poliuretano.

2.5.2.3 Extensores de cadeia

A reação direta de diisocianatos com polióis produz elastômeros extremamente macios e com baixa resistência mecânica. A adição de extensores de cadeia aumenta drasticamente as propriedades mecânicas. O papel dos extensores de cadeia consiste em produzir longas sequências de copolímeros alternados, combinando diisocianatos e extensores. Estas sequências alongadas, também denominadas de segmentos rígidos, aumentam a resistência mecânica por preenchimento dos espaços vazios e pela geração de ligações cruzadas físicas entre as macromoléculas. Dois extensores de cadeia largamente utilizados na indústria são apresentados na Figura 32.

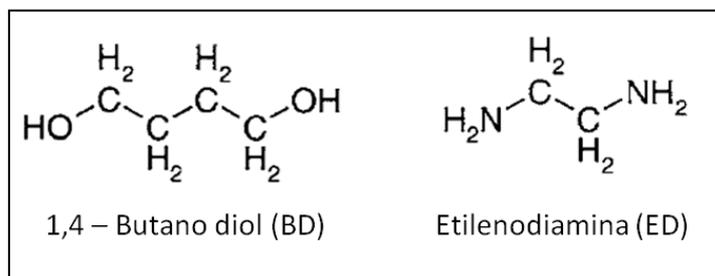


Figura 32 - Extensores de cadeia.

2.5.3 Propriedades Físicas

O poliuretano é um material versátil e, dependendo dos monômeros e do catalisador é possível produzir elastômeros de poliuretano de durezas variadas, obtendo-se assim materiais elásticos e macios semelhantes às borrachas ou materiais duros e de estrutura reticulada como plásticos.

Os elastômeros de poliuretano têm resistência química à água, solventes aromáticos, hidrocarbonetos alifáticos, ácidos orgânicos e bases. Ainda apresentam ótima resistência à abrasão, baixa sensibilidade ao entalhe, alto alongamento e grande resistência ao impacto. Tantas qualidades colocam o poliuretano como destaque no mercado de elastômeros, seja pela grande variedade de propriedades, custo ou facilidade de fabricação. Algumas aplicações dos elastômeros de acordo com seu grau de dureza podem ser visualizadas na Figura 33.

Elastômeros de Poliuretano	Escala de Dureza			Borrachas e Plásticos Convencionais
	Shore A	Shore D	Rockwell R	
			150	
			140	→ Fenólicos
			130	
			120	→ Acrílicos
			110	→ Policarbonato
		80	100	
Rolos de fábrica de papel →		70	90	→ Nylon
Limpador de ferramentas para forjamento →		60	70	→ Poliestireno
				→ Polipropileno
Ponteira de martelos para ajuste →	95	50	50	
Penus sólidos de caminhão →	90	40		
Amortecedores de prensas de forjamento →	80	30		
Revestimento de rolos →				→ Banda de Pneu
Suporte para lixas abrasivas →	70			
Palhetas de parabrisa →	60			
Vedações de portas e aberturas →	50			→ Câmaras
Amortecedor de impacto para máquinas →	40			
	30			
Rolos de impressão →	20			→ Elásticos

Figura 33 - Aplicação do elastômero de poliuretano.

2.5.3.1 Propriedades em tração

Muitos plásticos apresentam grande resistência à tração e a extensão (alto módulo), em contrapartida, apresentam baixo alongamento. Muitas borrachas, por outro lado, apresentam alto alongamento, mas baixa resistência à tração. Já os elastômeros de poliuretanos apresentam a vantagem de combinar um grande alongamento com alta resistência à tração e alto módulo. Essa combinação oferece resistência e durabilidade para as peças fabricadas. A Figura 34 demonstra curvas de tensão-deformação para alguns elastômeros de poliuretano e algumas borrachas convencionais. A capacidade do

poliuretano de sustentar altas cargas o distingue e diferencia dos demais elastômeros.

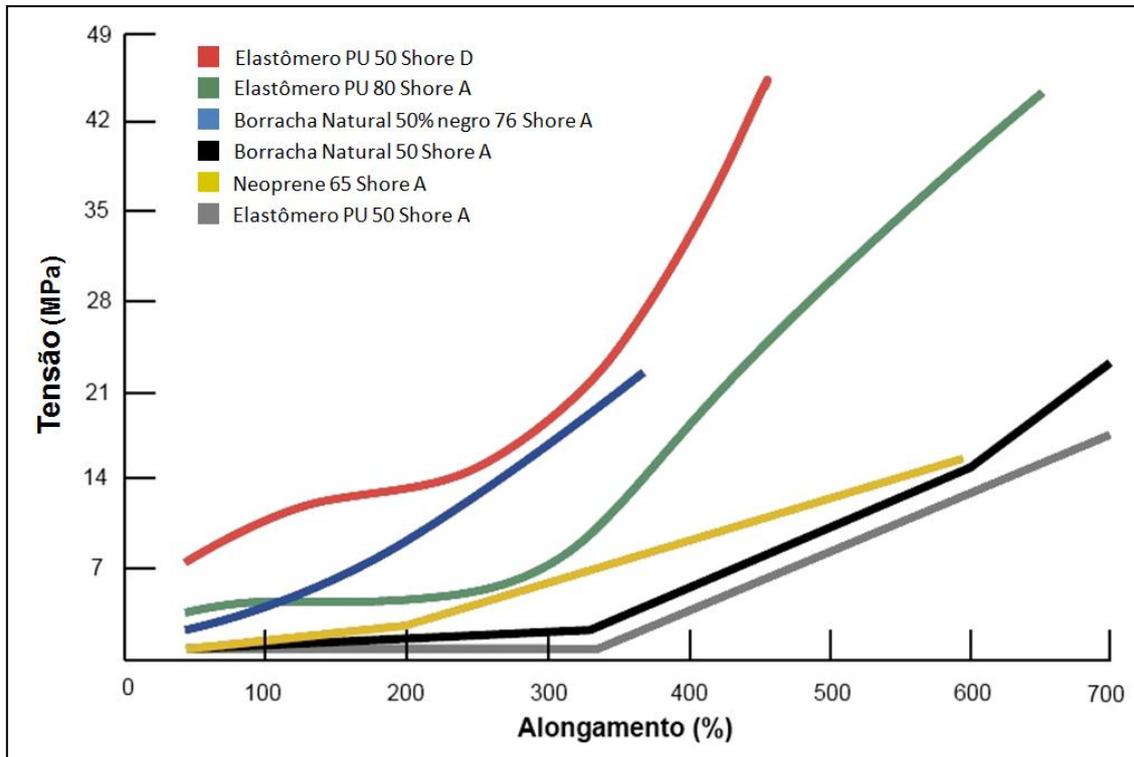


Figura 34 - Propriedades mecânicas em tração de alguns elastômeros. (AirProducts 2008)

A Figura 35 mostra a relação da tensão e dureza Shore em dois alongamentos distintos, 50 e 100%. Outra característica relevante dos poliuretanos é de manter a dureza sob tensão, essa condição permite as peças suportarem maior carga sem o risco de ruptura do material.

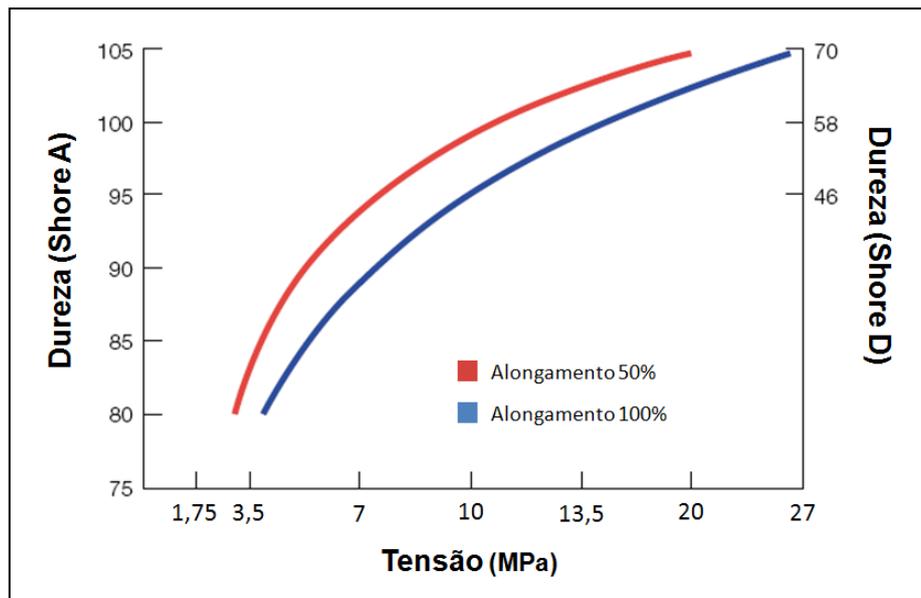


Figura 35 - Relação dureza e tensão em 50% e 100% de alongamento em tração. (AirProducts 2008)

2.5.3.2 Propriedades em compressão

Quando o carregamento é de compressão o mesmo princípio de tensão é aplicado, quanto maior a dureza menor a deformação ou distorção do elastômero. A Figura 36 esquematiza o comportamento de compressão de poliuretanos e borrachas convencionais. A grande resistência dos poliuretanos em compressão combinada com a resistência ao entalhe e a abrasão favorece a aplicação dos poliuretanos em rodízios, pneus de caminhão, rolo de alimentação, amortecedores de prensa, entre outras.

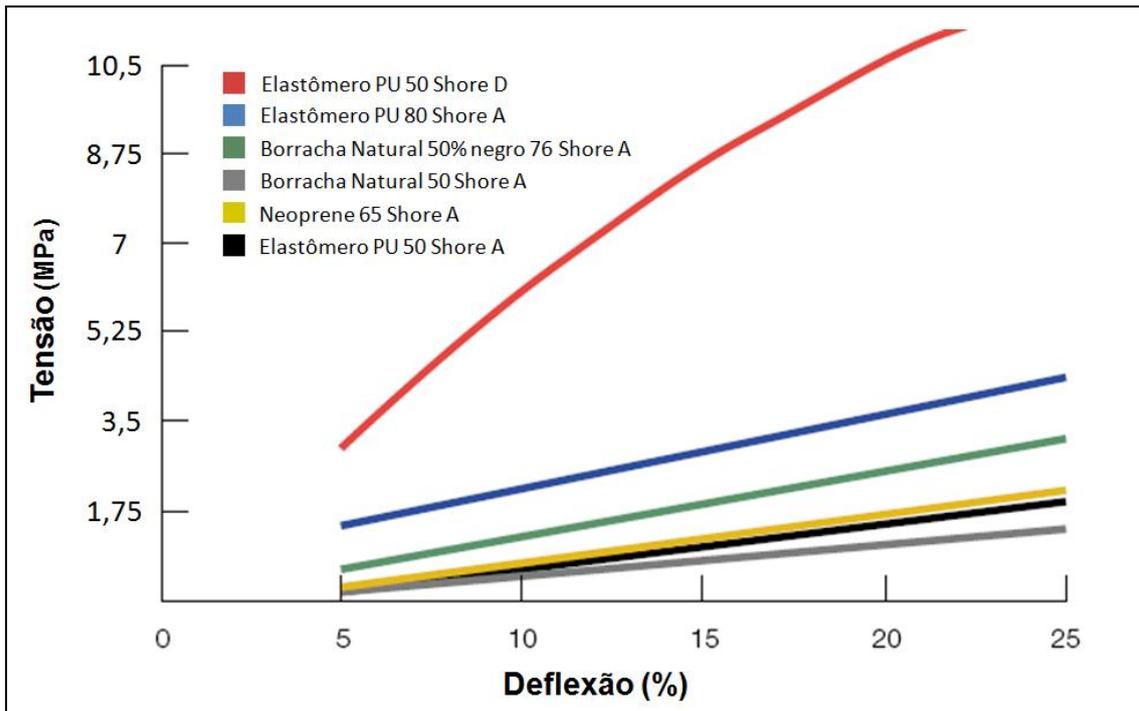


Figura 36 - Propriedades mecânicas em compressão de alguns elastômeros. (AirProducts 2008)

A Figura 37, análoga a Figura 36 analisa a relação de dureza e tensão em dois níveis de deflexão, 5 e 10%. As curvas indicam quanto maior a dureza maior a solicitação compressiva para uma deformação específica. Cabe-se ressaltar a evidente superioridade dos poliuretanos em resistir solicitações de compressão.

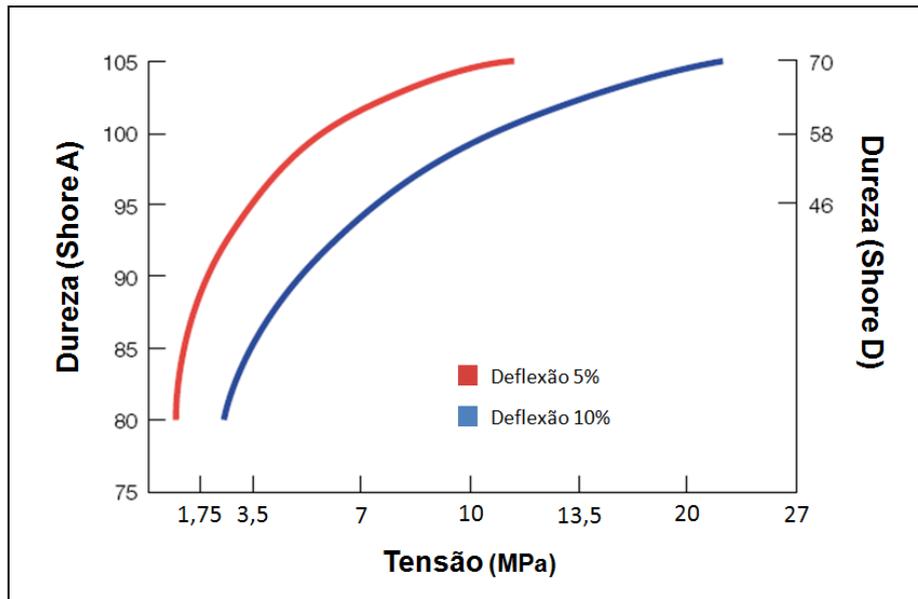


Figura 37 - Relação dureza e tensão em 5% e 10% de deflexão em compressão. (AirProducts 2008)

2.5.3.3 Geração de calor dinâmico

Uma vez que nenhum material é perfeitamente elástico, repetidas deformações cíclicas provocam intenso atrito entre as cadeias poliméricas gerando calor. Supondo que nenhuma perda de calor para o ambiente seja considerada, a taxa de elevação de temperatura de um elastômero dependerá da amplitude de deformação, frequência e da natureza química do material. A análise de geração de calor é de fundamental importância para projetos que envolvam carregamentos cíclicos, uma vez que o aumento substancial na temperatura acarreta abrupta perda de propriedades mecânicas.

Os poliuretanos possuem vantagens para aplicações dinâmicas por apresentarem uma grande faixa de dureza e por conseqüência, uma menor geração de calor na peça. Porém, nem todos os poliuretanos apresentam boas propriedades dinâmicas, mesmo com durezas iguais, assim como será visto adiante.

Na Figura 38 é observada uma representação esquemática de uma máquina de ensaios utilizada para avaliação de elastômeros de poliuretanos sólidos. O pneu de PU é acoplado a um cubo de metal e, posto então em rotação constante sob aplicação constante de carregamento. Termopares são

acoplados para medir o aumento de temperatura no pneu. O teste é interrompido quando a temperatura for suficiente para a decomposição do polímero ensaiado.

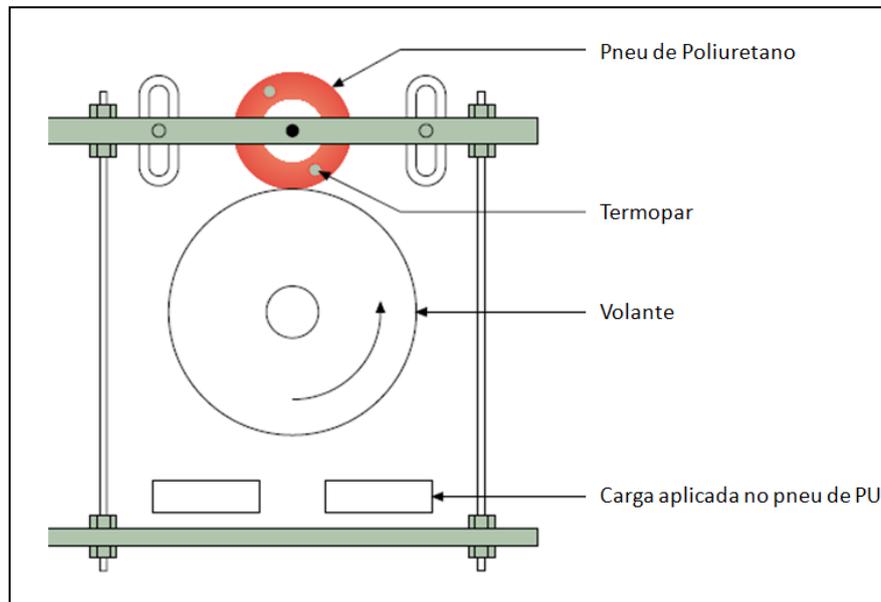


Figura 38 - Esquema da máquina de ensaios para geração de calor.(AirProducts 2008)

A Figura 39 compara resultados de elastômeros fabricados com poliéster e poliéter de dureza 90 Shore A e 50 Shore D. As curvas mostram que para uma mesma dureza os poliuretanos a base de poliéter apresentam maior resistência a falha devido à geração de calor interna.

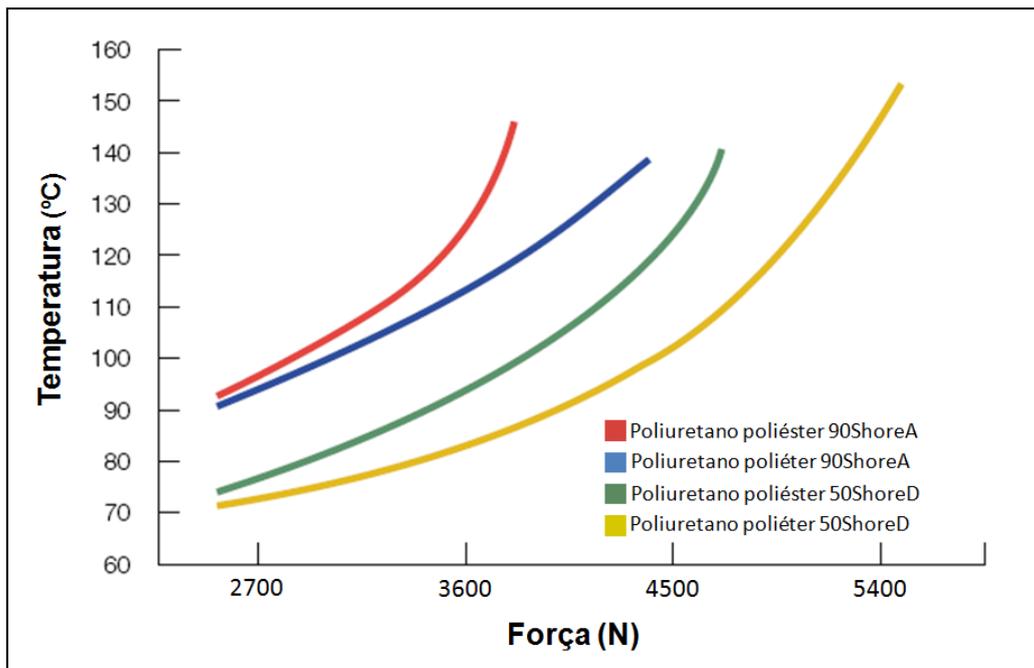


Figura 39 - Geração de calor dinâmico. (AirProducts 2008)

2.5.3.4 Resistência ao meio

Normalmente os elastômeros apresentam boa resistência às condições adversas encontrada nas aplicações. Sua estrutura química é inerte a agentes oxidantes e solventes a base de hidrocarbonetos. Os elastômeros de poliuretano podem ser utilizados em refinarias, ambientes com presença de óleo, em aplicações de mineração, rolos de impressão, dentre outras.

Devido à quantidade de agentes danificadores que as peças elastoméricas podem estar sujeitas, é aconselhável a utilização de testes com os solventes presentes no meio de aplicação e, assegurando assim, uma boa resistência do material. A Tabela 3 expõe o comportamento dos elastômeros sob ação de agentes danificadores comumente encontrados em campo.

Tabela 3 - Resistência dos elastômeros as condições do meio.

Meio	Elastômero de PU Poliéster	Elastômero de PU Poliéter	Borracha Natural	Borracha de Neoprene	SBR
Calor	B	A	A	B	B
Frio	B	B	E	B	B
Tempo	E	E	R	B	A
Resistência ao Ozônio	E	E	R	A	R
Óleo ASTM N°1	E	A	R	B	R
Óleo ASTM N°3	E	R	R	B	R

Solventes Alifáticos	E	A	R	B	R
Solventes Clorados	A - B	R	B	R	R
Solventes Aromáticos	A	R	R	A	R
Ácidos Diluídos	R - A	A	B	B	A - B
Alcalinas Diluídas	R - A	A	B	B	A - B

E – Excelente ; B – Bom ; A – Aceitável ; R - Ruim

2.5.3.5 Resistência a Abrasão

Em muitas aplicações de elastômeros de poliuretanos, as propriedades como resistências a abrasão e baixo atrito são essenciais. Baixos coeficientes de atritos são obtidos com o acréscimo de dureza. Em diversos experimentos, seja em campo ou laboratorial, os elastômeros apresentam resistência ao desgaste maior que muitos materiais, como, aços.

Thelin estabeleceu um método significativo para determinar as propriedades de resistência à abrasão de um material através da introdução de um abrasivo em determinados intervalos durante o ensaio (Thelin 1970). Este teste foi utilizado para determinar os efeitos da dureza de elastômeros de poliuretano sobre resistência à abrasão e comparar os resultados com a resistência à abrasão de outros materiais.

Em uma comparação direta com o aço, os elastômeros de poliuretano mostraram-se mais resistente ao desgaste, especialmente nas faixas de menor dureza, como pode ser observado na Figura 40 abaixo

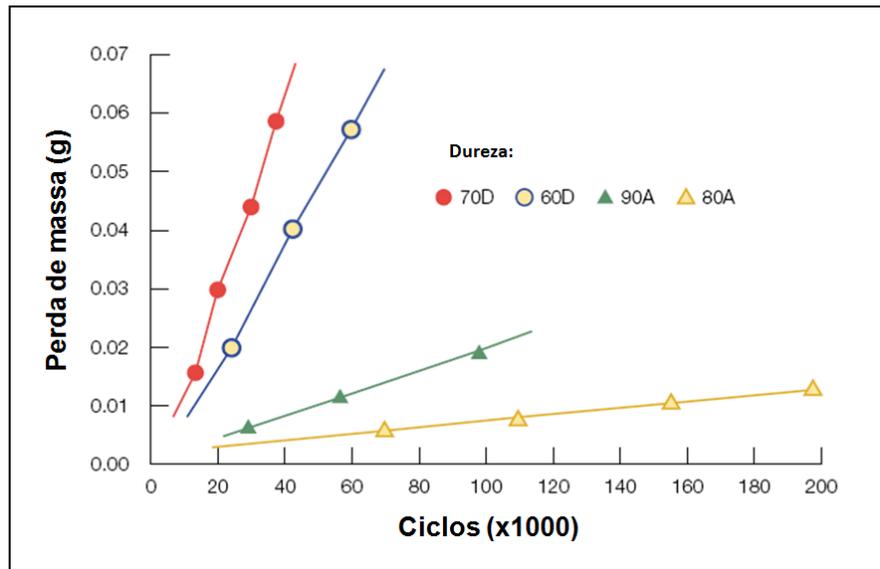


Figura 40 - Perda de massa acumulativa por abrasão junto ao aço. (AirProducts 2008)

Utilizando pó de silício como abrasivo, o elastômero de poliuretano de dureza 80 Shore A, apresentava uma perda de apenas 1,2 mg em peso versus uma perda de 392 mg do aço, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 - Perda de massa dos elastômeros de PU em comparação com o aço. (AirProducts 2008)

Elastômeros de PU	Perda de Massa em 20.000 ciclos (g)
80 Shore A	0,0012
90 Shore A	0,0037
60 Shore D	0,0210
70 Shore D	0,0359
Aço	0,392

2.6 .ELASTICIDADE NÃO-LINEAR

A habilidade dos elastômeros em retornar ao seu estado original após alongamentos extremos é caracterizada como elasticidade em grandes deformações. O entendimento dessa capacidade está na compreensão de como as deformações são altamente afetadas pelas definições de tensão e deformação.

2.6.1 Definição dos componentes de tensão

Na teoria da elasticidade em pequenas deformações, os componentes de tensão em um corpo deformado são definidos considerando o equilíbrio de

um cubo infinitesimal (ver Figura 41). Por convenção as tensões são definidas como positivas no sentido normal e de saída da face do cubo.

As arestas do cubo estão alinhadas paralelamente aos eixos de coordenadas x, y e z . Forças por unidade de área atuantes nas faces do cubo são P_1 no plano yz , P_2 no plano zx e P_3 no plano xy . O equilíbrio de forças implica que forças similares atuam nas faces ocultas do cubo.

As forças podem ser decomposta em nove componentes nas direções x, y e z .

$$P_1 = \sigma_{xx}, \sigma_{xy}, \sigma_{xz} \quad (2.2)$$

$$P_2 = \sigma_{yx}, \sigma_{yy}, \sigma_{yz} \quad (2.3)$$

$$P_3 = \sigma_{zx}, \sigma_{zy}, \sigma_{zz} \quad (2.4)$$

Como o cubo está em equilíbrio definimos que:

$$\sigma_{xy} = \sigma_{yx}, \sigma_{xz} = \sigma_{zx}, \sigma_{yz} = \sigma_{zy} \quad (2.5)$$

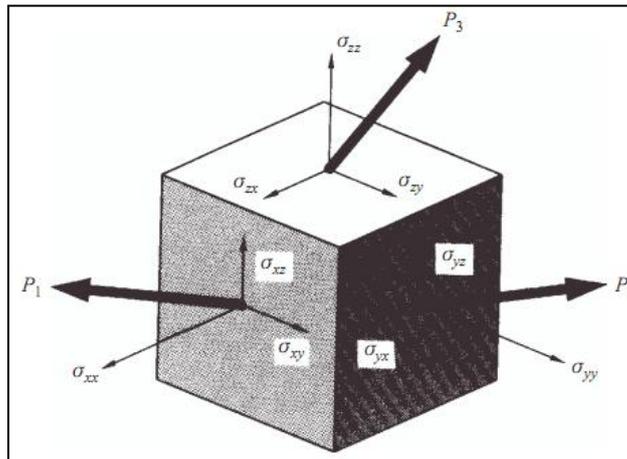


Figura 41 - Componentes de tensão.

Os componentes de tensão podem ser definidos por seis componentes independentes: componentes de tensão normal ($\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$) juntamente com os componentes de tensão cisalhante ($\sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}$). Usualmente, esboçamos os componentes de tensão em formato matricial, denominado tensor σ_{ij} .

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{yx} & \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \sigma_{zy} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Quando as deformações são pequenas, considera-se que as áreas das faces do cubo não são afetadas. Por isso, é praticamente irrelevante se os componentes de tensão são retirados de um corpo deformado ou de um corpo não-deformado. Porém, quando se trata de grandes deformações isso não é verdade, mas, por simplificação, utilizamos aqui um corpo deformado para definir o tensor. Os componentes podem ser definidos da mesma forma utilizada em elasticidade para pequenas deformações.

2.6.2 Definição dos componentes de deformação

Considerando um sistema de eixos de coordenadas o qual possui origem O e um ponto P tendo coordenadas x , y e z . Quando o corpo se deforma, preservando a origem O fixa, o ponto P se move para a posição P' com coordenadas x' , y' e z' , onde:

$$x' = \lambda_1 x; y' = \lambda_2 y; z' = \lambda_3 z \quad (2.7)$$

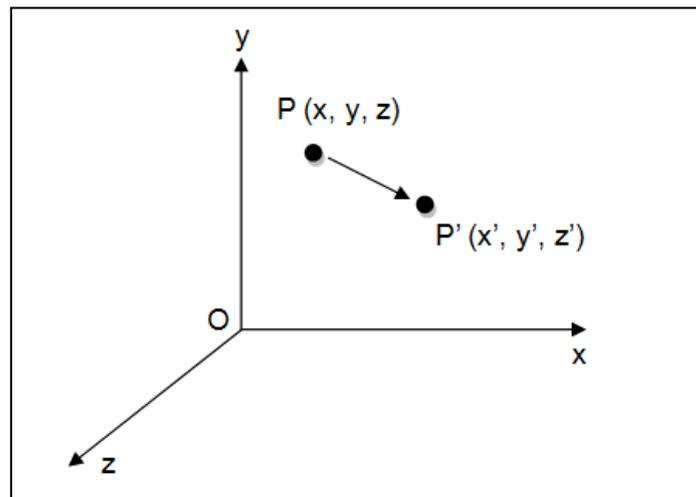


Figura 42 - Deslocamento do ponto P para P'.

Um esquema de representação da deformação pode ser visto na

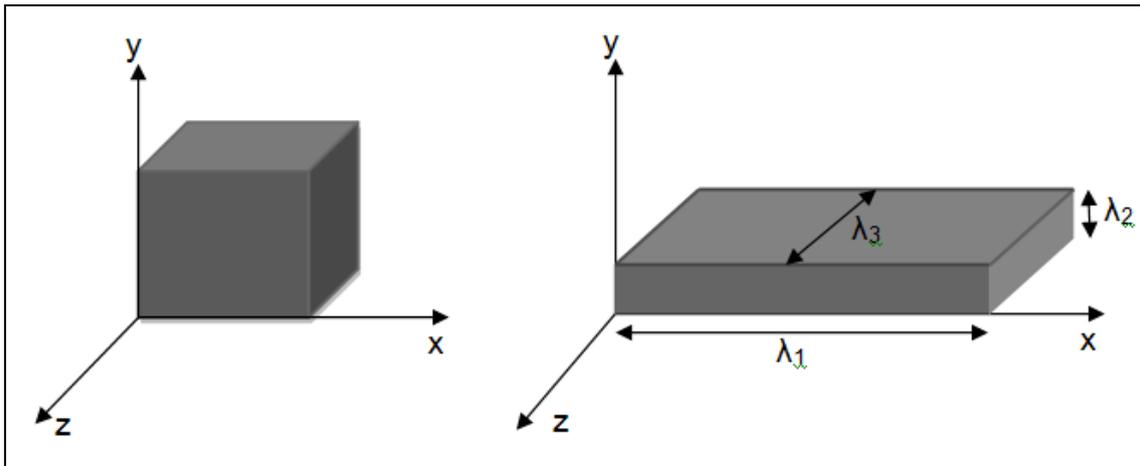


Figura 43. O cubo deforma tornando-se um paralelepípedo de lados λ_1, λ_2 e λ_3 nas direções x, y e z , respectivamente.

As dimensões λ_1, λ_2 e λ_3 são denominadas de razões de deformação, pois definem a razão entre o comprimento nas direções x, y e z do corpo deformado com o comprimento do corpo não-deformado.

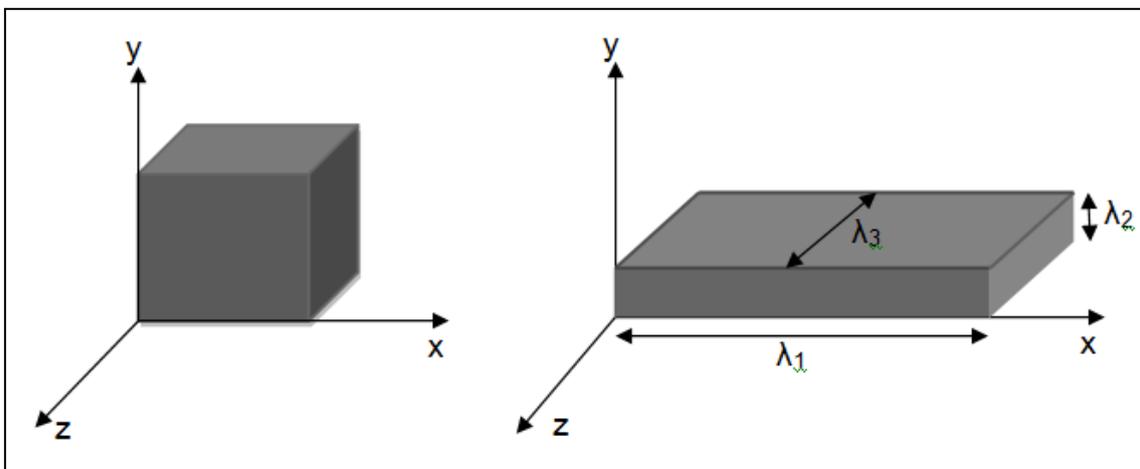


Figura 43 - Deformações do cubo em um paralelepípedo definindo as razões de deformação.

Deformações são convencionalmente definidas pelas três razões de alongamentos, assim, obtemos os três componentes de deformação: ε_{xx} , ε_{yy} , ε_{zz} .

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{2}(\lambda_1^2 - 1), \varepsilon_{yy} = \frac{1}{2}(\lambda_2^2 - 1), \varepsilon_{zz} = \frac{1}{2}(\lambda_3^2 - 1) \quad (2.8)$$

As deformações ao longo dos eixos x, y e z , no estado não-deformado, que permanecem mutuamente perpendiculares, são chamadas de

deformações normais, pois os componentes de deformações cisalhantes são iguais a zero. A teoria de elasticidade em elastômero é construída utilizando essa simplificação.

Para um melhor entendimento, a Figura 44, representa uma esfera que após uma deformação, transformou-se em uma elipse. Nota-se que os eixos principais da elipse não coincidem com os eixos x , y e z escolhidos para representar o estado não-deformado.

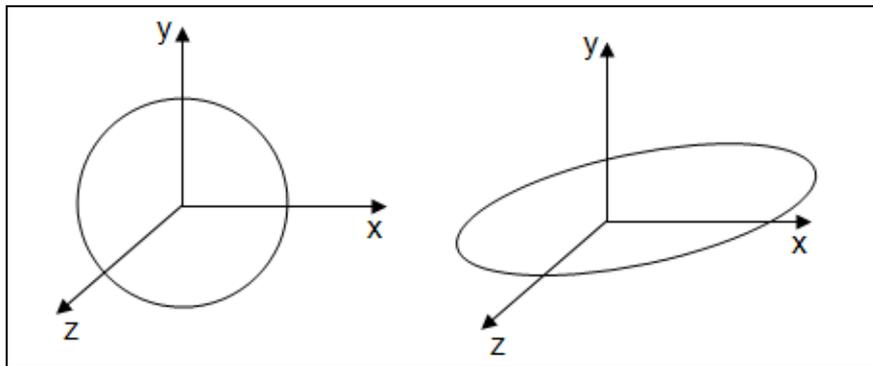


Figura 44 - Deformação de uma esfera.

Podemos, sem perda de generalidades, definir os eixos x , y e z no estado não-deformado de maneira conveniente para que estes eixos de coordenadas coincidam com os eixos principais da elipse deformada. Assim, podemos definir também a deformação em termos das deformações normais, utilizando somente os componentes definidos pelos alongamentos λ_1 , λ_2 e λ_3 .

2.6.3 Energia de Deformação

Relações de tensão foram desenvolvidas por Rivlin (Eirich 1956), assumindo que o material é isotrópico no comportamento elástico em seu estado não-deformado e incompressível. Considerações de simetria sugerem que medidas de deformações, independente da escolha dos eixos, são dadas por três invariantes de deformação, definidos a seguir:

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (2.9)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \quad (2.10)$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \quad (2.11)$$

Os valores de λ_i são obtidos por $(1+\varepsilon_i)$ onde ε_i é a deformação principal e os valores de I_1 é igual a zero no estado não-deformado, quando:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 1 \quad (2.12)$$

Para materiais incompressíveis o valor de I_3 é zero. Ou seja, apenas duas medidas de deformação, I_1 e I_2 , restam. O acúmulo de energia de elástica W em uma unidade de volume de material, sob um estado de deformação especificado por λ_1, λ_2 e λ_3 , é função somente de I_1 e I_2

$$W = W(I_1, I_2) \quad (2.13)$$

Quando a função W é expandida em uma série de potência em termos de I_1 e I_2 (os quais apresentam segunda ordem em λ_1, λ_2 e λ_3), a energia de deformação apresenta a forma:

$$W = C_1 I_1 + C_2 I_2 \quad (2.14)$$

onde C_1 e C_2 são constantes. Essa forma de energia de deformação foi proposta por Mooney (Mooney 1940) e é chamada de equação de Mooney Rivlin. O termo C_1 pode ser obtido por relações de elasticidade para borrachas.

Pelo fato dos invariantes I_1 e I_2 possuírem seus termos na ordem ε^2 e ε^3 , a equação (2.14) é válida para uma faixa de deformação bem maior que as equações clássicas de pequenas deformações, onde termos maiores que a ordem ε^2 são negligenciados. Porém, deformações maiores que 25% possuem termos de quarta ordem e apresentam grandeza similar aos de terceira ordem, não podendo ser descartados. Dizemos então, que a equação (2.14) não é aplicável a total amplitude de deformações comumente encontrada nos materiais elastômeros, e sim somente a uma faixa limitada de deformação, bem menor que a unidade (Treloar 2005). Para incluir todos os termos de ordem I^2 (termos de ordem ε^4), seria necessário incluir nove termos na relação para W para sólidos elásticos compressivos, reduzindo para cinco termos para sólidos elásticos incompressíveis (Murnaghan 1951). Assim, para incluir os termos de ordem ε^4 na função energia de deformação faz-se necessário cinco coeficientes.

2.7 ELASTICIDADE EM ELASTÔMEROS

A principal característica dos elastômeros, como já foi comentada anteriormente, está na capacidade de retornar ao estado inicial após grandes deformações elásticas. É realmente esperado que com a aplicação de carregamento ocorra o tensionamento de moléculas, porém o surpreendente é o fato de que após a remoção dessas forças, as moléculas retornem ao estado emaranhado.

Teorias básicas sobre o comportamento elastomérico assumem como aproximação, que tanto a extensão como a retração ocorrem instantaneamente, negligenciando qualquer deformação permanente. Por exemplo, a borracha natural no seu estado natural não satisfaz o critério anterior, as moléculas na configuração estendida tendem a deslizar uma sob as outras e não retornam completamente ao estado inicial. As moléculas precisam ser quimicamente entrelaçadas através de ligações de enxofre.

Se considerarmos a aplicação de tensão como a causa do estiramento das moléculas, então é possível aplicar o equilíbrio termodinâmico para determinar qual a relação da tensão na variação de energia interna e de entropia no corpo deformado. Através desta aproximação termodinâmica não é possível obter informações sobre a reorganização molecular, mas quando correlacionamos com teorias estatísticas torna-se possível derivar equações que relacionam a força de extensão das cadeias junto a parâmetros moleculares.

Na teoria de elasticidade de materiais elastoméricos podemos assumir que mudanças no comprimento e na orientação das linhas que unem as ligações cruzadas adjacentes da rede molecular são idênticas as linhas macroscópicas de borrachas.

Elastômeros podem ser estendidos na faixa de 500 até 1000 por cento, esta grandeza depende diretamente do número de ligações cruzadas. A Figura 45 representa nos mostra uma curva de tração de um elastômero convencional.

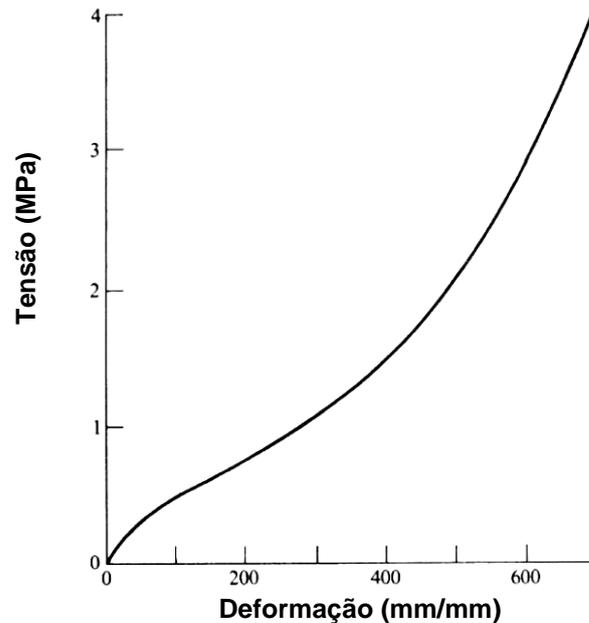


Figura 45 - Curva de tração de um elastômero comum.

Materiais elastômeros permanecem no regime linear elástico em uma curta faixa de deformação que não costumam ultrapassar um por cento (1%). Ou seja, a maior parte da curva tensão-deformação encontra-se no regime não-linear, seja elástico ou plástico.

Baseados nos estudos de Treolar (Treloar 1949) relações constitutivas de deformação podem ser criadas através da termodinâmica. Grandes extensões resultam em uma grande redução de entropia, logo, a retração vem por consequência da necessidade da entropia em se maximizar. Uma molécula completamente estendida corresponde a um estado zero de entropia por existir apenas um modo de conformação entre as ligações. Em contrapartida, quando contraímos uma molécula surgem inúmeros modos de deformação. Como o estado tensionado e comprimido apresentam aproximadamente a mesma energia interna, uma molécula estendida tende a retornar para um estado mais provável (Ward and Sweeney 2004).

2.8 MODELOS CONSTITUTIVOS PARA ELASTICIDADE EM ELASTÔMEROS

A estrutura macromolecular em rede dos materiais elastoméricos habilita esses materiais a retornarem ao estado inicial após grandes deformações. A estrutura subjacente é randomicamente orientada e, sendo assim as longas cadeias moleculares se arranjam em formato de rede devido à grande

dispersão das ligações cruzadas entre as moléculas. Além disso, as ligações intermoleculares são relativamente fracas. A configuração desta estrutura resulta em um comportamento tensão-deformação governado primeiramente pelas mudanças de entropia, assim a rede molecular antes aleatoriamente orientada é preferencialmente direcionada no sentido do alongamento. As características de tensão-deformação dos materiais elastoméricos podem ser modeladas por tratamento termodinâmico estatístico e alongamentos mecânicos baseados na teoria da mecânica do contínuo, onde o comportamento é descrito pelos invariantes e/ou alongamentos.

Nos últimos anos grandes avanços na mecânica computacional propiciou a implementação de códigos em softwares especializados, principalmente de elementos finitos, para análises de grandes deformações. Estes avanços permitem uma avaliação crítica e um maior desenvolvimento dos modelos constitutivos existentes para borracha. Análises tridimensionais de alto grau de dificuldade exigem ao máximo dos modelos (Boyce and Arruda 2000).

Vários modelos já foram implementados e muitos estão sendo desenvolvidos na tentativa de prever o comportamento dos materiais em grandes deformações. Nesta seção mostraremos apenas os modelos computacionais de hiperelasticidade convenientes ao trabalho.

2.8.1 Tratamento estatístico

A teoria estatística ou cinética tenta derivar as propriedades de tensão-deformação através de modelos idealizados da estrutura macromolecular dos elastômeros

Uma revisão aprimorada sobre o tratamento estatístico do comportamento mecânico de elasticidade não-linear para elastômeros é desenvolvida por Treloar (Treloar 2005). As aproximações estatísticas começam com a adoção de uma longa estrutura molecular aleatoriamente orientada e, essa cadeia pode assumir uma imensa variedade de configurações em resposta a excitações térmicas ou vibracionais de seus átomos. As cadeias moleculares são interligadas a fim de formar uma rede

estruturada, entretanto o número de ligações cruzadas é considerado pequeno o bastante para que não interfira na mobilidade da cadeia (Ward and Sweeney 2004).

No tratamento Gaussiano a distribuição do comprimento entre o início e o fim da cadeia, r , é dado por $P(r)$:

$$P(r) = 4\pi \left(\frac{3}{2\pi nl^2} \right)^{3/2} r^2 \exp\left(-\frac{3r^2}{2nl^2}\right) \quad (2.15)$$

onde n é o número de ligações na cadeia e l é o comprimento de cada ligação.

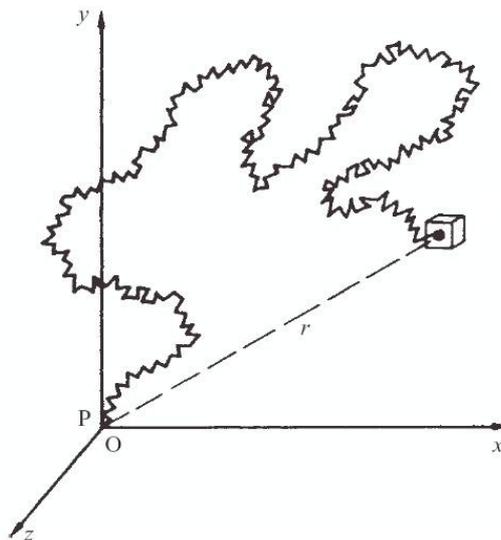


Figura 46 - Cadeia livremente distribuída (Ward and Sweeney 2004).

Quando uma deformação é aplicada, a estrutura da cadeia polimérica é então tensionada e por ocasião dessa configuração sua entropia decresce. Se considerarmos a deformação de um conjunto de N cadeias nos alongamentos principais ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$) e a deformação em cada cadeia de comprimento r não se aproxima do comprimento da cadeia esticada nl ($r \ll nl$), então temos a função energia de deformação elástica, W_G , derivada da mudança de entropia configuracional e é dada por (Ward and Sweeney 2004).

$$W_G = \frac{1}{2} Nk\theta(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \quad (2.16)$$

onde k é a constante de Boltzmann's e θ é a temperatura absoluta. A relação tensão-alongamento pode ser obtida pela diferenciação da função energia de deformação com seus respectivos alongamentos (Boyce and Arruda 2000).

Para aplicar as formulações estatísticas mais precisamente, torna-se necessário o desenvolvimento de modelos que possam relacionar o alongamento individual de cada cadeia sob determinada deformação. Para tal, assumem-se estruturas representativas no formato rede.

Quatro modelos de rede podem ser observados na Figura 47. A célula unitária utilizada em cada um dos modelos deforma-se nas direções principais. Os modelos diferem-se na relação entre a deformação das cadeias e a deformação da célula unitária. Observa-se ainda que por efeitos de aproximações a célula unitária é incompressível uma vez que a magnitude do módulo de compressibilidade é muito superior ao módulo de cisalhamento do elastômero.

No modelo (a) da Figura 47, as três cadeias estão localizadas nos eixos do cubo inicialmente indeformado. As cadeias deformam-se juntamente com a célula cúbica, assim, o alongamento de cada cadeia corresponde aos valores de alongamentos principais da célula. A função energia de deformação é dada por (Ward and Sweeney 2004).

$$W_{3ch} = \frac{Nk\theta}{3} \sqrt{n} \left[\lambda_1 \beta_1 + \sqrt{n} \ln \left(\frac{\beta_1}{\sinh \beta_1} \right) + \lambda_2 \beta_2 + \sqrt{n} \ln \left(\frac{\beta_2}{\sinh \beta_2} \right) + \lambda_3 \beta_3 + \sqrt{n} \ln \left(\frac{\beta_3}{\sinh \beta_3} \right) \right] \quad (2.17)$$

onde $\beta_i = \mathcal{L}^{-1} \left(\frac{\lambda_i}{\sqrt{n}} \right)$; para $i = 1, 2, 3$.

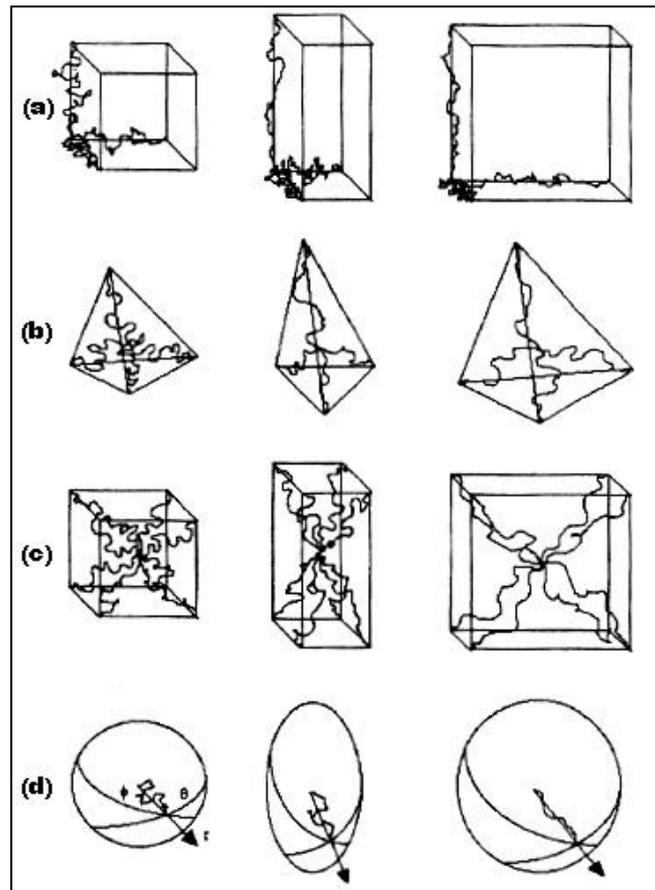


Figura 47 – Modelos de estruturas de rede de (a) rede de 3 cadeias, (b) 4 cadeias, (c) 8 cadeias e (d) modelo de rede completa (Boyce and Arruda 2000).

No modelo (b) quatro cadeias estão unidas no centro de um tetraedro indeformado. Quando deformações são impostas as cadeias deformam-se sem alguma conformidade com a deformação da célula unitária. Esta estrutura de rede fornece uma deformação mais cooperativa entre as cadeias devido à união no ponto de junção. A relação entre o alongamento das cadeias e da célula unitária é obtida de forma iterativa, a fim de satisfazer o equilíbrio. Portanto, uma simples função energia de deformação é obtida, e não convém ser aprofundada aqui.

Já o modelo de oito cadeias, também conhecido como modelo de **Arruda-Boyce**, as cadeias encontram-se distribuídas ao longo das diagonais da célula unitária. A simetria formada nesta estrutura faz com que o ponto de junção localizado no centro do cubo permaneça no mesmo local mesmo após aplicação dos esforços. Sendo assim, o alongamento de cada cadeia pode ser obtido através da raiz quadrada dos alongamentos principais da célula unitária, logo temos a função energia de deformação:

$$\lambda_{chain} = \left(\frac{1}{3} (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2) \right)^{1/2} \quad (2.18)$$

$$W_{8ch} = Nk\theta\sqrt{n} \left[\beta_{chain} \gamma_{chain} + \sqrt{n} \ln \left(\frac{\beta_{chain}}{\sinh \beta_{chain}} \right) \right] \quad (2.19)$$

onde:

$$\beta_{chain} = \mathcal{L}^{-1} \left(\frac{\gamma_{chain}}{\sqrt{n}} \right) \quad (2.20)$$

No modelo completo (d), ou modelo total de cadeias, as cadeias assumem posições randomicamente distribuídas no espaço da célula unitária e deformam livremente. A função energia de deformação é obtida integrando toda resposta tensão-alongamento em todo comprimento de cadeia r . Essa integração é computacionalmente intensiva, e pode ser bem aproximada por uma média entre os modelo de três e oito cadeias (Boyce and Arruda 2000).

2.8.2 Modelo de Mooney

Na mesma época do desenvolvimento da teoria estatística, Mooney realizou a primeira tentativa significativa no desenvolvimento da teoria fenomenológica. A teoria baseia-se na mecânica do contínuo e apenas fornece estrutura matemática para descrever o comportamento elástico dos elastômeros de modo que a análise de tensão e deformação possa ser realizada sem necessitar dos conceitos moleculares. Mooney assume que o material é homogêneo, isotrópico, elástico, incompressível e obedece a lei de Hooke sob cisalhamento. Baseado nas considerações acima e em argumentos matemáticos envolvendo simetrias, Mooney mostrou que W é dado por:

$$W = C_1 (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) + C_2 (\lambda_1^{-2} + \lambda_2^{-2} + \lambda_3^{-2} - 3) \quad (2.21)$$

onde C_1 e C_2 são constantes do material (Yeoh and Fleming 1997).

2.8.3 Modelo de Rivlin

Rivlin tratou do problema de deformação de um material homogêneo, isotrópico, elástico e incompressível através das séries de potência infinitas (Hoss 2009).

$$W = \sum_{i+j=1}^{\infty} C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (2.22)$$

onde C_{ij} são constantes do material e I_1 e I_2 são invariantes de deformação do tensor deformação de Green que pode ser dado em termos dos alongamento principais.

A função energia de deformação de Rivlin é usualmente truncada, tomando apenas os termos de maior importância. Se apenas o primeiro termo for tomado temos que:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) \quad (2.23)$$

Rivlin descreve os materiais que obedece a eq. (2.24) como **neo-Hookeano** (Yeoh 1993). Quando tomamos somente os dois primeiros termos, a formulação de Rivlin reduz a:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (2.24)$$

A eq. (1.25) tornou-se conhecida como equação de **Mooney-Rivlin** (Gent and Campion 2001).

2.8.4 Modelo de Rivlin e Saunders

Rivlin e Saunders estudaram o comportamento tensão-deformação de borrachas sob diferentes modos de deformação, como tensão, cisalhamento puro, torção e extensão biaxial. Os pesquisadores chegaram a conclusão que a derivada parcial, $\delta W/I_1$, pode ser considerada independente de I_1 e I_2 , enquanto $\delta W/I_2$ é independente de I_1 , mas decresce com o aumento de I_2 . Estas considerações implicam em uma função energia de deformação (Rivlin and Saunders 1951):

$$W = C(I_1 - 3) + f(I_2 - 3) \quad (2.25)$$

2.8.5 Modelo de Gent e Thomas

Em 1958 Gent e Thomas (Gent and Thomas 1958) apresentaram um modelo que possui a grande vantagem de empregar apenas duas constantes

constitutivas baseadas nos 1º e 2º invariantes de deformação e apresenta a função energia de deformação dada por:

$$W = C_1(I_1 - 3) + 3C_2 \ln(I_2) + \frac{1}{2} \lambda \{(\ln J)^2 + (J - 1)^2\} \quad (2.26)$$

onde C_1 e C_2 são as constantes do material e, J é o determinante do tensor gradiente de deformação (Hoss 2009).

2.8.6 Modelo de Ogden

Provavelmente o modelo mais famoso depois de Moone-Rivilin. Ogden propôs a função energia de deformação baseada nos alongamentos principais ao invés dos invariantes (Ogden 1972).

$$W = \sum_n \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) \quad (2.27)$$

onde μ_n e α_n são constantes e podem assumir qualquer valor, inclusive não inteiros. O modelo de Ogden é considerado um modelo muito versátil, pois através de simplificações pode ser obtido o modelo Neo-Hookeano ou de Mooney-Rivilin (Hoss 2009).

2.8.7 Modelo de Van der Waals

O nome do modelo deriva da analogia com as equações termodinâmicas de estado. Enquanto o modelo Neo-Hookeano pode ser comparado ao um gás ideal, a função energia de deformação de Van der Waals é análogo a um gás real. Essa consideração adiciona dois parâmetros do material, o alongamento máximo para bloqueio λ_m e o parâmetro de interação global, a (Kilian 1981).

$$W = \mu \left\{ -(\lambda_m^2 - 3) [\ln(1 - \eta) + \eta] - \frac{2}{3} a \left(\frac{I-3}{2} \right)^{\frac{3}{2}} \right\} \quad (2.28)$$

onde

$$I = (1 - \beta)I_1 + \beta I_2 \text{ e } \eta = \sqrt{\frac{I-3}{\lambda_m^2-3}} \quad (2.29)$$

β representa a combinação linear dos invariantes I_1 e I_2 e para $\beta = 0$ temos a energia de deformação em função apenas do primeiro invariante.

2.8.8 Modelo de Yeoh

Segundo Yeoh a sensibilidade da função energia de deformação com o segundo invariante é muito menor que as mudanças com o primeiro invariante (Yeoh 1993). Além disso, Yeoh ressalta a dificuldade de medir a dependência do segundo invariante e, sendo assim, é preferível negligenciá-lo ao invés de calculá-lo baseado em medições potencialmente imprecisas. Desta forma, a função energia de deformação fica:

$$W = \sum_{i=1}^N C_{i0} (I_1 - 3)^i \quad (2.30)$$

O modelo de Yeoh assemelha-se muito ao modelo polinomial, por isso também é conhecido como Polinomial Reduzido. O modelo apresenta um bom desempenho em grandes deformações e, sua versão mais utilizada é para $N=3$. Já na tentativa de aperfeiçoar o modelo para pequenas deformações Yeoh adicionou um termo exponencial e ficou conhecido como **Yeoh-Modificado** (Yeoh 1993):

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3 + \frac{\alpha}{\beta} (1 - e^{-\beta(I_1-3)}) \quad (2.31)$$

2.8.9 Modelo Polinomial

O modelo polinomial foi elaborado através da observação de que muitos modelos propostos na literatura eram baseados em polinômios. Apresenta dependência dos dois primeiros invariantes e tem sua função energia de deformação dada por (Hoss 2009):

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (2.32)$$

É um modelo muito utilizado, pois através de simplificações e configurações podemos transformá-lo em outros modelos como Mooney-Rivlin, Neo-Hookeano ou Yeoh.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Informações sobre as propriedades físicas dos materiais são fundamentais para que qualquer projeto de engenharia possa ser bem sucedido. Tratando-se de materiais com comportamento não-linear, como os elastômeros, essas informações tornam-se indispensáveis. Características reológicas, densidade, tensão de ruptura, alongamento máximo e dureza são alguns exemplos de propriedades normalmente obtidas na indústria (Marczak, Hoss et al. 2006). No entanto, como o interesse deste trabalho é caracterizar mecanicamente o elastômero de poliuretano para uma aplicação específica, apenas ensaios condizentes com as solicitações a serem experimentadas foram selecionados.

Dados referentes à composição química das formulações e métodos de fabricação do material selecionado não são relatados neste trabalho em respeito aos direitos de exclusividade do fabricante do material. As propriedades mecânicas foram determinadas com as máquinas de ensaios apresentadas na Figura 48. À esquerda, observa-se a máquina de fuso utilizada nos ensaios estáticos. Na direita, uma máquina servo-hidráulica, empregada nos ensaios dinâmicos.



Figura 48 - Máquinas de ensaio utilizadas na caracterização mecânica.

3.1 MEDIÇÃO DE DUREZA

Um dos métodos de classificação de elastômeros é através da dureza. Assim, uma amostra de cada ensaio mecânico foi selecionada para medidas de dureza. As medições ocorreram em cinco regiões escolhidas aleatoriamente. A Figura 49 mostra o durômetro manual de escala Shore A utilizado.



Figura 49 - Durômetro Shore A manual.

3.2 ENSAIO DE COMPRESSÃO

O ensaio de compressão foi classificado como o ensaio de maior significância, dentre os estáticos, por apresentar condições de carregamento semelhantes à aplicação no presente estudo. Deste modo, ensaios de compressão definidos em normas ASTM (*American Standard Test Methods*) foram realizados para determinar o comportamento mecânico do PU utilizado.

A Norma ASTM propõe dois ensaios de compressão para caracterização mecânica de polímeros, ASTM D575 (ASTM 1991) e ASTM 695 (ASTM 2008). O primeiro foi desenvolvido especialmente para a indústria de borracha e, o segundo, é ideal para plásticos rígidos e resinas. No entanto, como o poliuretano é considerado um polímero de transição entre elastômeros e plásticos rígidos, os dois ensaios foram realizados e comparados.

3.2.1 ASTM D 695

A ASTM D695 titula-se "*Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics*". Apesar de a norma apresentar procedimento de ensaio próprio para plásticos rígidos, os espécimes de poliuretano puderam ser caracterizados através deste ensaio, apenas sendo necessário o cuidado com a centralização da amostra na máquina de ensaios a fim de não ocorrer flambagem. As dimensões dos espécimes são apresentadas na Figura 50.

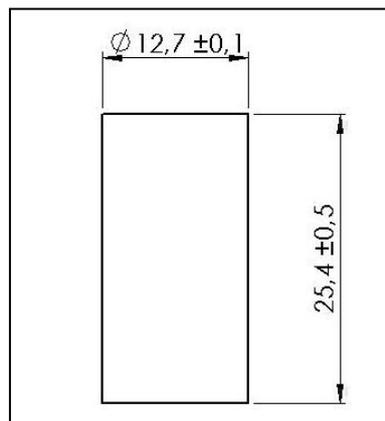


Figura 50 - Dimensões do espécime conforme ASTM D695.

3.2.2 ASTM D 575

O ensaio de compressão conforme a norma ASTM D575 "*Standard Test Methods for Rubber Properties in Compression*" foi realizado com a intenção de avaliar o efeito da relação de aspecto diâmetro e altura, uma vez que as dimensões das amostras D575, conforme Figura 51, geram uma razão de aspecto 4,5 vezes maior que as amostras D695. Outra condição que difere esse ensaio é o tipo de contato entre amostra e os pratos da máquina de ensaios. A norma D695 estipula a utilização de fitas de *Teflon*® para reduzir o atrito, enquanto a norma D575 condiciona a utilização de lixas d'água de granulometria 400 entre os pratos e à amostra, impedindo o deslizamento das bordas do espécime.

Outra especificação do ensaio é a realização de ciclos de carregamento. Segundo a norma, três ciclos devem ser executados e somente o último

registrado e usado para qualificar o material. A estratégia garante a eliminação do efeito Mullins da amostra. No entanto, como o poliuretano apresenta dureza elevada, comparada a das borrachas convencionais, o fenômeno de amolecimento é mais acentuado e se manifesta durante um período maior. Assim, cinco ciclos de compressão foram executados, sendo apenas o último registrado e utilizado.

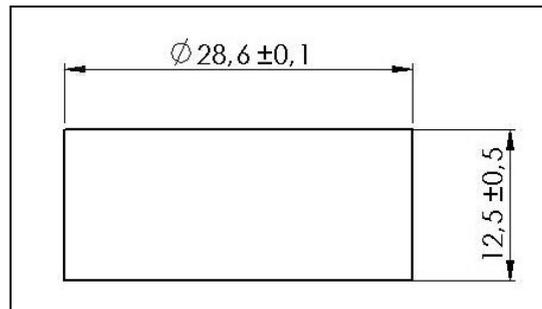


Figura 51 - Dimensões do espécime conforme ASTM D575.

3.3 ENSAIO DE FADIGA EM COMPRESSÃO

O ensaio de fadiga, também denominado de ensaio de histerese, foi baseado na norma ASTM D2231 - "*Standard Practice for Rubber Properties in Forced Vibration*" (ASTM 1987). A norma não chega a definir especificamente um procedimento de ensaio, mas descreve algumas características que devem ser preferencialmente atendidas.

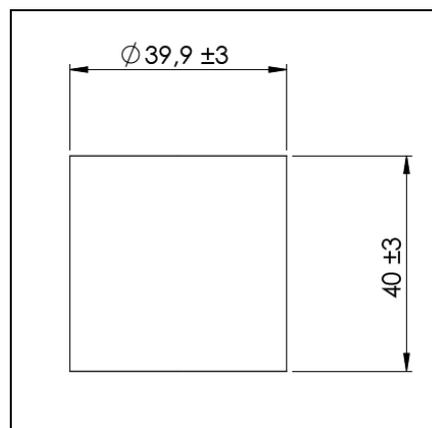


Figura 52 - Dimensões dos espécimes.

Para obter as primeiras características dinâmicas do material, dois ensaios de fadiga foram realizados. Sendo o primeiro controlado por

deslocamento e o segundo por controle de força. Os parâmetros iniciais da análise foram retirados por indicação de fornecedores e experiência prática de aplicações em campo. Segundo estas referências informais, o elastômero de poliuretano teria comportamento dinâmico constante em deformações de até 20% e em frequências de até 10Hz. No entanto, como o ensaio da linha flexível e *Bend Stiffener* não ultrapassariam frequências de 0,2Hz, a frequência do ensaio de fadiga foi reduzida convenientemente a um valor mais próximo do ensaio real, porém não tão baixa, pois demandaria muito tempo por ensaio. Assim, o valor selecionado para a frequência dos primeiros ensaios foi fixado em 1Hz.

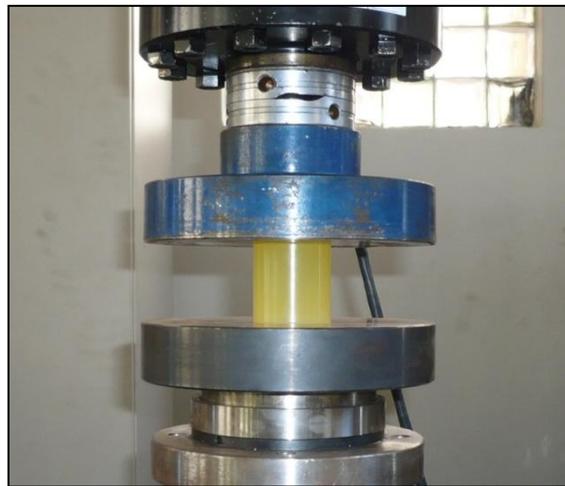


Figura 53 - Montagem do ensaio de fadiga em compressão.

3.3.1 Controle de Deslocamento

Partindo da premissa que os espécimes teriam comportamento estável sob deformações de até 20%, o ensaio de fadiga, conduzido através do controle de deslocamento, foi realizado de acordo com a Figura 54 abaixo.

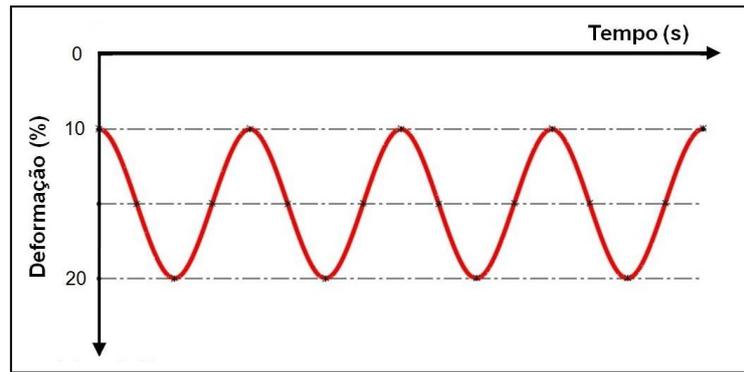


Figura 54 - Carregamento do ensaio de controle de deslocamento

Considerando as dimensões do espécime, Figura 52, o limite superior e inferior foi fixado em **-4** e **-8** mm, com 10 e 20% de deformação respectivamente. Para realização do ensaio, 250.000 ciclos foram executados e registrados.

3.3.2 Controle de Força

Os parâmetros para o ensaio de fadiga com controle de força foram retirados através da análise dos resultados do ensaio com controle de deslocamento. No presente ensaio, com limites de -4 e -8mm, a perda de rigidez chegou a aproximadamente 7% para o limite inferior.

Um dos requisitos iniciais do projeto foi que o deslocamento das molas permanecesse dentro da tolerância de 10%. Portanto, para o ensaio com controle de força, o deslocamento inferior poderia oscilar no intervalo de -7,2 a -8,8mm e ainda estaria dentro da tolerância estipulada. Observado a perda de rigidez acentuada nos primeiros ciclos é conveniente projetar a mola para que inicie a ciclagem o mais próximo possível do deslocamento referente a tolerância superior, ou seja -7,2mm.

Assim, o carregamento foi constantemente aplicado no espécime até que o deslocamento atingisse 7,2mm. Alcançado este deslocamento, a força registrada, **-8000N**, foi fixada como limite inferior. A falta de informações sobre a amplitude de carregamento a ser utilizada no ensaio real fez com que o limite superior fosse estimado. Utilizando uma razão de carregamento convencional em ensaios de fadiga, no valor de 0,1, definiu-se o limite superior, **-800N**, Figura 55.

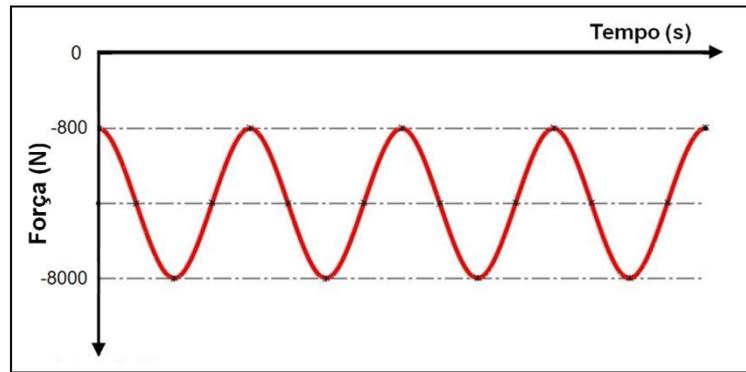


Figura 55 - Carregamento no ensaio de controle de força.

No controle de força, 320.000 ciclos foram aplicados no espécime.

3.4 SELEÇÃO DO MODELO CONSTITUTIVO

Utilizando a curva tensão-deformação gerada nos ensaios de compressão foi possível selecionar o modelo constitutivo adequado para simulação numérica via elementos finitos. Os modelos hiperelásticos empregados fazem parte do pacote comercial do software ABAQUS® e são eles:

- Arruda-Boyce
- Mooney-Rivlin
- Neo-Hookeano
- Polinomial N=2
- Ogden N=2, N=3 e N=6
- Yeoh

3.4.1 Avaliação do erro dos modelos hiperelásticos

Para uma efetiva comparação entre os modelos hiperelásticos fez-se necessário um estudo do erro que cada modelo apresentou. Dois métodos foram utilizados para mensurar esse valor.

3.4.1.1 Cálculo do erro normalizado.

Tem-se uma normalização do erro tendo como base os resultados dos ensaios, então:

$$erro \equiv 100 \frac{E}{P} \quad (3.1)$$

onde E é definido como o erro absoluto,

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_i - E_i| \quad (3.2)$$

e P é o valor absoluto dado pelos pontos dos modelos,

$$P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_i| \quad (3.3)$$

E_i é dado pelos pontos de tensão dos ensaios experimentais, P_i pelos pontos de tensão referentes aos resultados dos modelos hiperelásticos e N é o número de pontos obtidos nos ensaios.

Então temos que quanto menor for o erro normalizado mais próximo será o modelo hiperelástico do ensaio experimental.

3.4.1.2 Cálculo do valor de R^2

Outra maneira de verificar a qualidade dos modelos empregados é o cálculo de R^2 . Definimos E como sendo a média dos valores de tensão dos resultados experimentais,

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i \quad (3.4)$$

onde SSE como sendo a soma dos quadrados dos erros dos resultados de tensão dos modelos perante os resultados de tensão dos ensaios,

$$SSE = \sum_{i=1}^N (P_i - E_i)^2 \quad (3.5)$$

e SST como sendo a soma dos quadrados dos desvios dos pontos de tensão obtidos nos ensaios,

$$SST = \sum_{i=1}^N (E_i - E)^2 \quad (3.6)$$

obtemos assim o valor de R^2 :

$$R^2 = \begin{cases} 1 - \frac{SSE}{SST}, & \text{se } SSE \leq SST \\ 0 & \end{cases} \quad (3.7)$$

Quanto mais próximo o valor de R^2 estiver de 1, no modelo hiperelástico, melhor representará o ensaio experimental.

3.4.2 Validação do modelo selecionado

Após a verificação dos erros normalizado e R^2 , o modelo foi avaliado através da comparação com um ensaio de compressão. A geometria do corpo de prova utilizado foi a mesma do ensaio de histerese representada pela Figura 52. Três ciclos de carga e descarga foram executados com a intenção de eliminar o efeito de amolecimento inicial. A taxa de aplicação e retirada de carga adotada foi igual a 0,1mm/s. O ensaio regido por controle de deslocamento manteve-se entre os limites de 0 e -7,8mm.

3.5 DIMENSIONAMENTO DA MOLA

A interatividade entre a modelagem auxiliada por computador CAD (*Computer Aided Design*), simulação numérica CAE (*Computer Aided Engineering*) e os ensaios de compressão e fadiga condicionaram uma geometria ideal para as molas.

Por meio do ensaio de compressão foi possível estimar a razão de aspecto ideal entre o diâmetro e a altura, sendo ela próxima de 1 (um). Já o ensaio de fadiga possibilitou a análise do comportamento mecânico do material sob carregamento cíclico e compressivo. Nos ensaios realizados, sob deformações de 20%, o material apresentou perda de rigidez acentuada. Logo, o projeto das molas deveria proporcionar deformações abaixo deste limite ensaiado.

Partindo da condição de que o deslocamento do módulo de compensação deveria ser de 50mm e que a deformação máxima seria 20%, a mola teria altura de 250mm. Adicionando o requisito de razão de aspecto igual a 1, as dimensões da mola seriam aproximadamente 250mm de diâmetro e 250mm de altura. No entanto, dois fatores impediram o uso de molas nestas dimensões: o alto percentual de deformação verificado no ensaio de fadiga e a alta massa de PU em cada mola. Quanto maior o volume de material maior a

probabilidade de variação das propriedades mecânicas. Também, maior é geração de calor devido ao trabalho mecânico.

Assim, a deformação para o projeto foi fixada em 15%, o que necessitaria aproximadamente 330 mm no comprimento. Pelas mesmas condições da primeira análise de viabilidade tornar-se-ia inviável fabricar molas com 330 mm de diâmetro e 330 mm de comprimento. Então, a idéia de se ter duas camadas de molas foi utilizada. Logo cada mola teria dimensões de 165 mm de diâmetro e 165 mm de altura. No entanto, era preciso fixar as molas no módulo de compensação e, para isso, acrescentou-se um furo central. Utilizando as ferramentas computacionais CAD e CAE, foi possível dimensionar adequadamente a geometria da mola. O resultado final pode ser visto na Figura 56 abaixo.

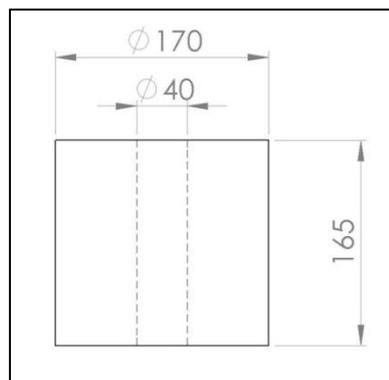


Figura 56 - Dimensões finais da mola

3.6 CARACTERIZAÇÃO DA MOLA EM ESCALA 1:5

A fim de avaliar o comportamento da geometria selecionada, a um baixo custo, optou-se por utilizar um modelo em escala. A Figura 57 esquematiza as dimensões utilizadas em escala 1:5.

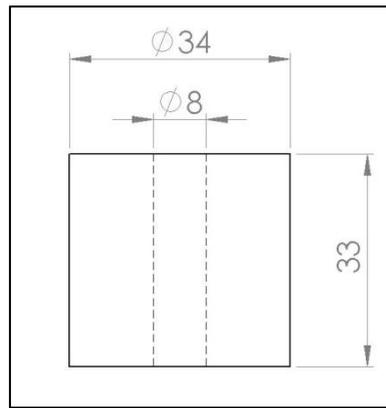


Figura 57 - Geometria da Mola em escala 1:5.

3.6.1 Ensaios Cíclicos de Compressão

Estudos realizados por Bergstrom (Bergstrom and Boyce 2000), Qi (Qi and Boyce 2005) e Tomita (Tomita, Azuma et al. 2008) descrevem procedimentos de ensaios para quantificar a dependência do material quanto à taxa de deformação, ao tempo de relaxação e a amplitude de deformação. Esses ensaios foram convenientemente adaptados para o caso estudado.

Uma das preocupações existentes no teste do *Bend Stiffener* era o desconhecimento da frequência de ensaio, por não ser possível definir exatamente o comportamento mecânicos do conjunto *Bend Stiffener*, *riser* e molas poliméricas sob carregamento combinado de tração e flexão. O único dado conhecido era o limite máximo para a frequência, no valor de 0,2Hz. Logo, ensaios cíclicos de compressão foram realizados em três frequências 0,1, 0,15 e 0,2Hz. Com a variação da frequência de aplicação de carga foi possível avaliar a sensibilidade do material e da geometria da mola quanto à variação da taxa de deformação.

Até o momento, tinham-se apenas dados referentes ao ensaio de fadiga com deformação máxima de 20%. Mas, como descrito na seção anterior, a mola foi modelada para receber deformações de 15% na força máxima de 1500KN. Sabe-se que quanto menor a deformação menor é a perda de rigidez e conseqüentemente maior é a vida em fadiga. No entanto, tornar-se-ia necessário realizar ensaios com deformações menores, pois o ensaio na

bancada continha diferentes blocos de carregamento, com carregamentos menores ou iguais ao dado inicial de 1500KN. Assim, aproveitando os ensaios de taxa de deformação variável acrescentaram-se também diferentes deformações máximas, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 - Matriz de ensaios da mola 1:5.

Deformação Máxima (%)	10	15	20
	0,1	0,1	0,1
Freqüência (Hz)	0,15	0,15	0,15
	0,2	0,2	0,2

A Figura 58 mostra os três primeiros ciclos dos nove ensaios descritos na matriz de ensaios apresentada na Tabela 5. Para visualização geral, dois grupos com freqüências de 0,15 e 0,2Hz foram defasados no tempo em 30 e 50 segundos respectivamente. Nota-se que os primeiros ciclos fogem do perfil senoidal dos demais, devido ao tempo de estabilização do servo-controle hidráulico. Sendo assim, os resultados para o primeiro ciclo dos ensaios não foram analisados.

A fim de obter informações relevantes de dependência da freqüência e deformação, os ensaios cíclicos foram registrados até o ciclo de número 50. Por fim, os resultados foram divididos e comparados em três grupos: 10%, 15% e 20% de deformação.

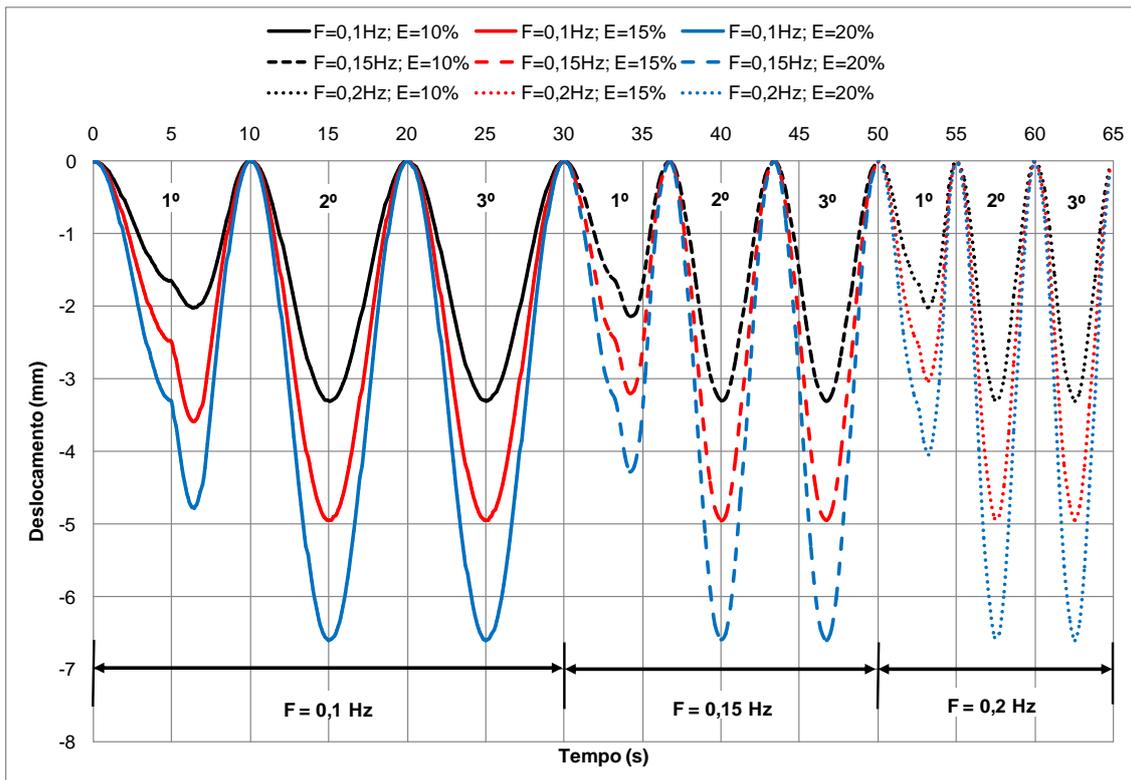


Figura 58 - Perfil de carregamento nos três primeiros ciclos.

3.6.2 Ensaio Patamar de Carregamento

Durante o processo de aplicação e retirada de carga, se o ensaio for interrompido, a dependência do tempo da tensão (alívio de tensão ou relaxação sob deformação constante) ou da deformação (fluência sob tensão constante) pode ser observada (Qi and Boyce 2005). Neste contexto, ensaios de relaxação, foram realizados em ciclos de carga e descarga, onde as amostras foram comprimidas a uma deformação máxima de 25%, com diferentes taxas de deformações (0,02/s, 0,03/s e 0,04/s) e interrupções de 60s a cada incremento de 5% de deformação, durante o carregamento e descarregamento.

A Figura 59 demonstra o perfil de carregamento e descarregamento, conforme descrito acima, em uma amostra sob 0,02/s de taxa de deformação.

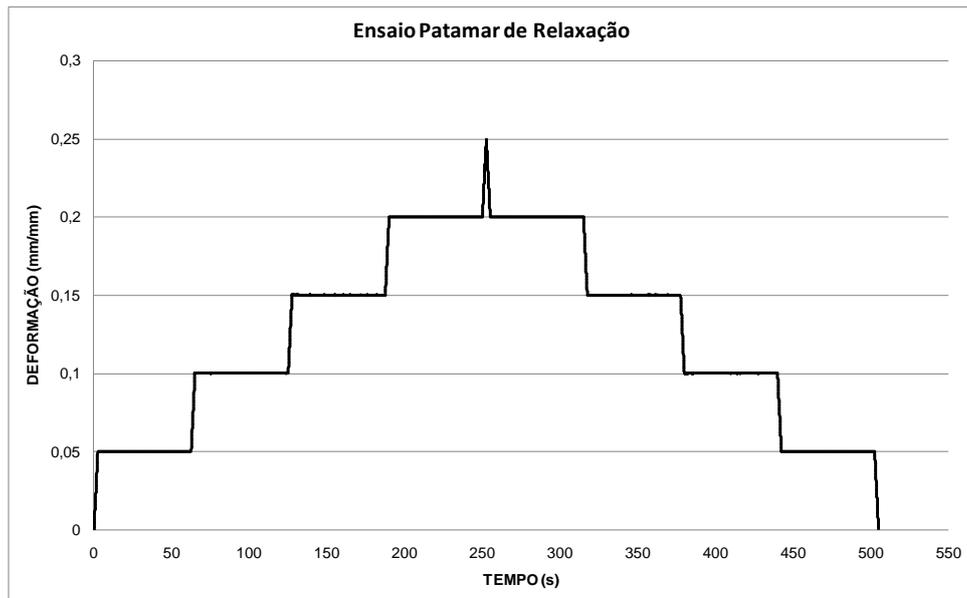


Figura 59 - Perfil de aplicação e retirada de carga no ensaio de patamar.

3.6.3 Ensaio de fadiga em compressão na mola 1:5

O ensaio descrito pela seção 3.3 foi repetido, porém com carregamentos sob controle de deslocamento condizentes para a geometria da mola em escala 1:5, representada na Figura 57. Depois de observado os resultados dos ensaios cíclicos de compressão e de histerese definiu-se o novo perfil de carregamento. A frequência de carregamento foi fixada em 0,5Hz. Já a deformação permaneceu dentro dos limites de 14% e 8,5%. A mudança, principalmente do limite inferior (14%), deve-se à necessidade de considerar a perda inicial de rigidez, uma vez que o projeto da mola prevê deformações de 15%. Como o módulo de compensação apresenta tolerância de $\pm 10\%$, torna-se viável alocar um conjunto de molas com o menor índice de deformação no início do ensaio.

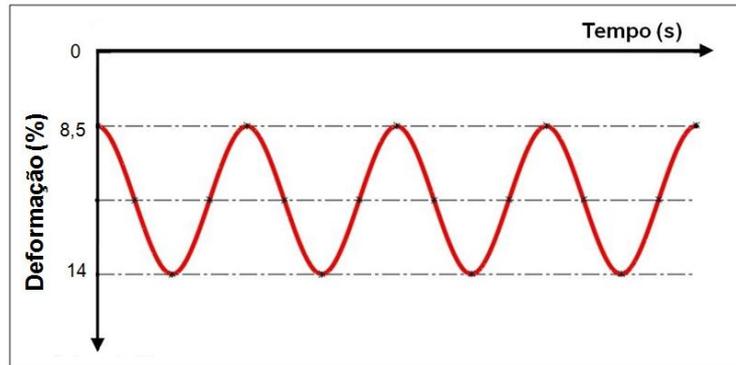


Figura 60 - Perfil de carregamento do ensaio de fadiga em compressão da mola 1:5.

3.7 ENSAIO DE COMPRESSÃO DA MOLA EM ESCALA REAL

O ensaio de compressão da mola em escala real foi realizado com intuito de verificar a uniformidade das propriedades mecânicas com o aumento do tamanho da amostra. A Figura 61 mostra o espécime na máquina de ensaios. Cinco ciclos de carga e descarga até 20% de deformação foram aplicados e registrados.



Figura 61 - Ensaio de compressão na mola em escala real.

3.8 MÓDULO DE COMPENSAÇÃO EM ESCALA 1:5

Após diversos ensaios mecânicos de caracterização do material, um modelo em escala reduzida, com fator igual a 1:5, foi elaborado a fim de determinar o comportamento global da montagem com molas em série e em paralelo, estudar os atritos do contato mecânico entre as chapas de aço e poliuretano, além do atrito das buchas pelas guias centralizadoras. A Figura 62

apresenta os componentes presentes na montagem do modelo em escala reduzida do módulo de compensação.

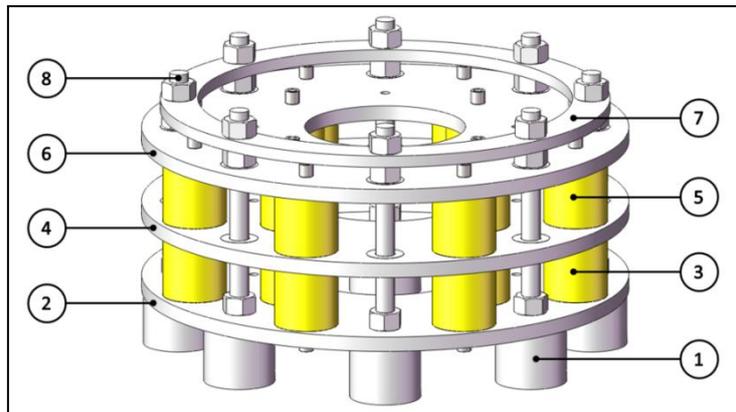


Figura 62 - Componentes do modelo do módulo de compensação. 1 – base do conjunto; 2 – base de apoio da primeira camada de molas; 3 – primeira camada de molas; 4 – base de apoio da segunda camada de molas; 5 – segunda camada de molas; 6 – chapa de fechamento do conjunto e aplicação de carga; 7 – anel centralizador das guias; 8 – guias com buchas de deslizamento.

O anel centralizador (7) juntamente com as guias (8), apresentadas na Figura 62, garantem apenas a distribuição de carga axial nas molas. Cada camada conta com 12 molas, sendo 4 no diâmetro interno e 8 no externo. O modelo ainda reserva 4 espaços para molas no diâmetro interno, conforme a Figura 63.

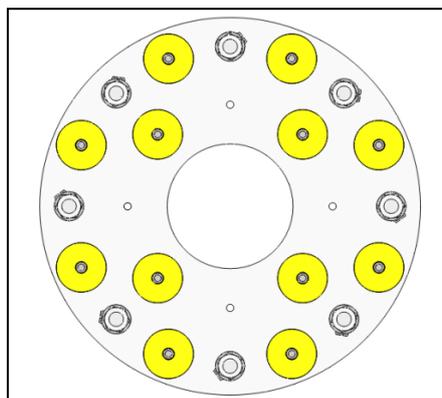


Figura 63 - Distribuição das molas em cada camada.

3.8.1 Ensaio com controle de força

O protótipo em escala reduzido foi posicionado em uma máquina de ensaios servo-controlada, própria para ensaios dinâmicos. A Figura 64, detalha a montagem do ensaio.

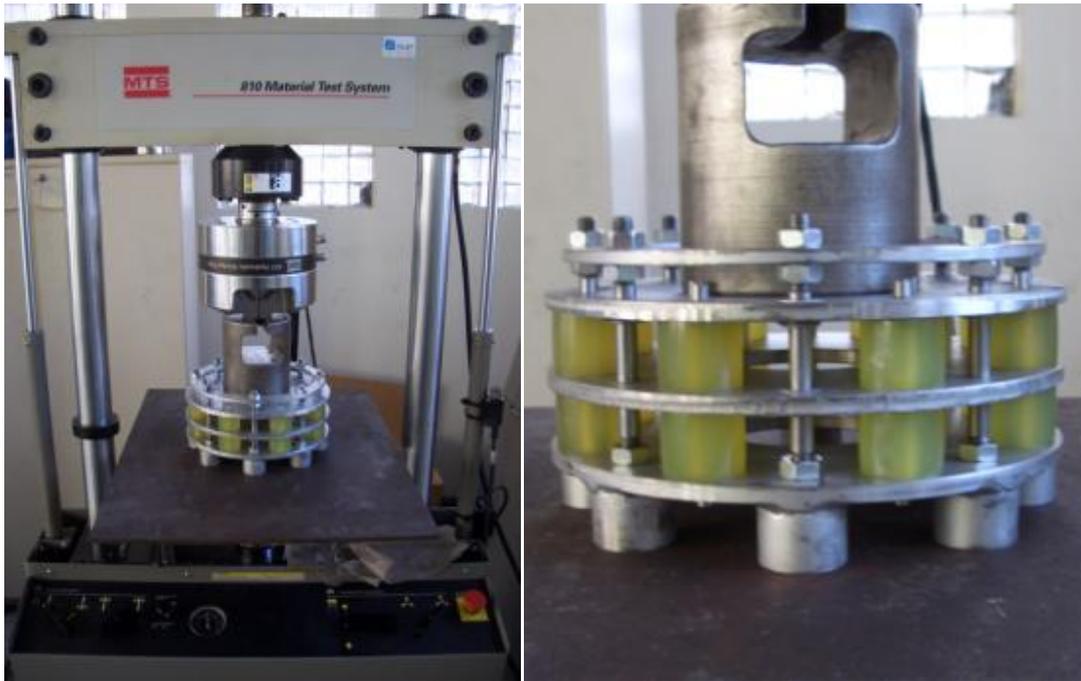


Figura 64 - Protótipo na máquina de ensaios

Em seguida, o modelo foi submetido a um carregamento compressivo e cíclico. O carregamento oscilante aplicado, $-49,4\text{KN}$ e $-29,6\text{KN}$, corresponde a níveis de tensão nas molas de $4,8\text{MPa}$ e $2,9\text{MPa}$ para as cargas mínimas e máximas respectivamente. A Figura 65 detalha o perfil de carregamento ajustado no ensaio.

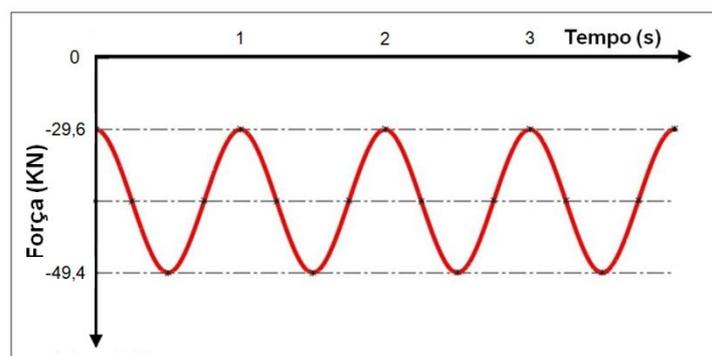


Figura 65 - Perfil de carregamento no protótipo em escala 1:5.

Por questões de disposição da máquina de ensaios a frequência de oscilação da carga foi fixada em 1Hz e o número máximo de ciclos em 15000 .

3.9 PROJETO DO MÓDULO DE COMPENSAÇÃO

Após análise dos resultados dos ensaios de caracterização do material, simulação numérica e teste com o protótipo, o projeto do módulo de compensação em escala real foi iniciado. A geometria manteve-se semelhante ao protótipo, porém algumas alterações fizeram-se necessárias para aumentar a versatilidade do projeto e reduzir as possibilidades de falha do conceito.

3.9.1 Distribuição dos esforços na bancada

Analisando-se a Figura 8, é possível perceber a angulação que a linha flexível (*riser*) inicia a partir da conexão onde se localiza o *Bend Stiffener*. Este ângulo é de aproximadamente 7° e deve-se ao fato do diâmetro do bocal de entrada da linha ser maior que o diâmetro do bocal de terminação. Além do ângulo de 7° fixo, a bancada de ensaios também impõe flexão no acoplamento do *Bend Stiffener*, com sentido oposto ao ângulo de 7° . O ângulo máximo de flexão é de 17° e coincide com a força máxima de tração durante a aplicação do carregamento oscilante.

De acordo com as premissas do projeto da bancada de ensaios, o módulo de compensação deveria comprimir 50mm quando a carga axial gerada pelo cilindro hidráulico fosse de 150 toneladas. Porém, a configuração com os ângulos não proporciona apenas carregamento axial, o que implica na distribuição de esforços. A Figura 66, esquematiza a distribuição de carga no eixo de rotação do módulo de flexão. O projeto das molas deve contemplar apenas esforço axial, dado pelo valor de F_1 . No entanto, este valor não é de simples definição, uma vez que a carga axial F_{axial} é absorvida por agentes não-lineares como o atrito, a deformação da linha flexível e *Bend Stiffener*.

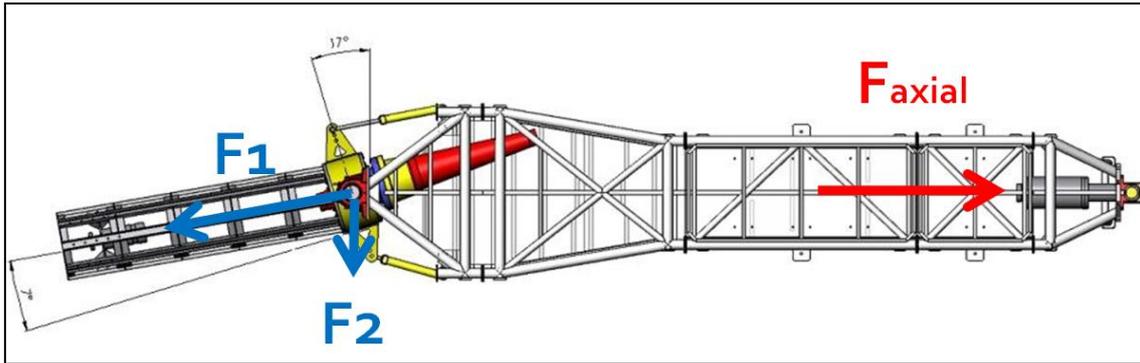


Figura 66 - Distribuição de esforços na bancada de ensaios na carga e ângulo máximo.

Ao invés de concentrar estudos na definição do esforço F_1 , adotou-se a estratégia de construir um módulo de compensação com rigidez ajustável. Logo, através de testes experimentais poder-se-ia chegar ao deslocamento desejado.

3.9.2 Variação da rigidez do conjunto

Uma maneira simples de alterar a rigidez é modificar o número de molas por camadas. No entanto, a remoção de molas atenderia apenas uma estreita faixa de carregamento. Assim, além de ter um sistema que viabilizasse a alteração do número de molas, criaram-se também conjuntos de molas com três diferentes diâmetros externos. A combinação entre número de molas e diâmetros proporciona um sistema versátil que atende carregamentos entre 70 e 200 toneladas. A Figura 67 apresenta esquematicamente como as diferentes molas poderiam ser dispostas nas camadas do módulo de compensação. O diâmetro interno das molas permaneceu inalterado, por questões de fixação. Já o diâmetro externo teve valores de 150, 160 e 170mm.

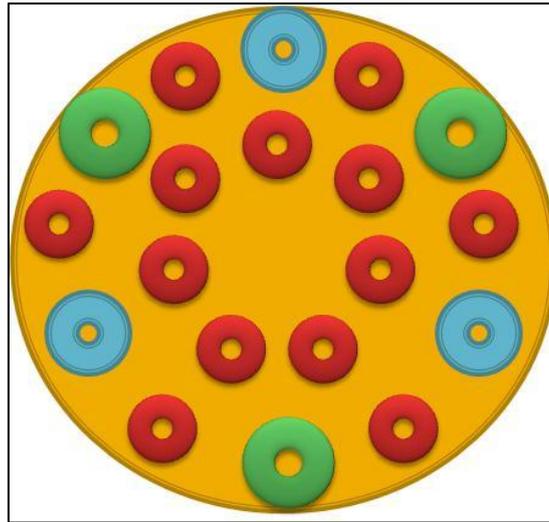


Figura 67 - Configuração variável das camadas de molas.

3.9.3 Geometria do módulo de compensação

A geometria do módulo de compensação foi então definida a fim de atender todas as especificações do projeto. A Figura 68 a Figura 70 detalham o conceito final do módulo de compensação.

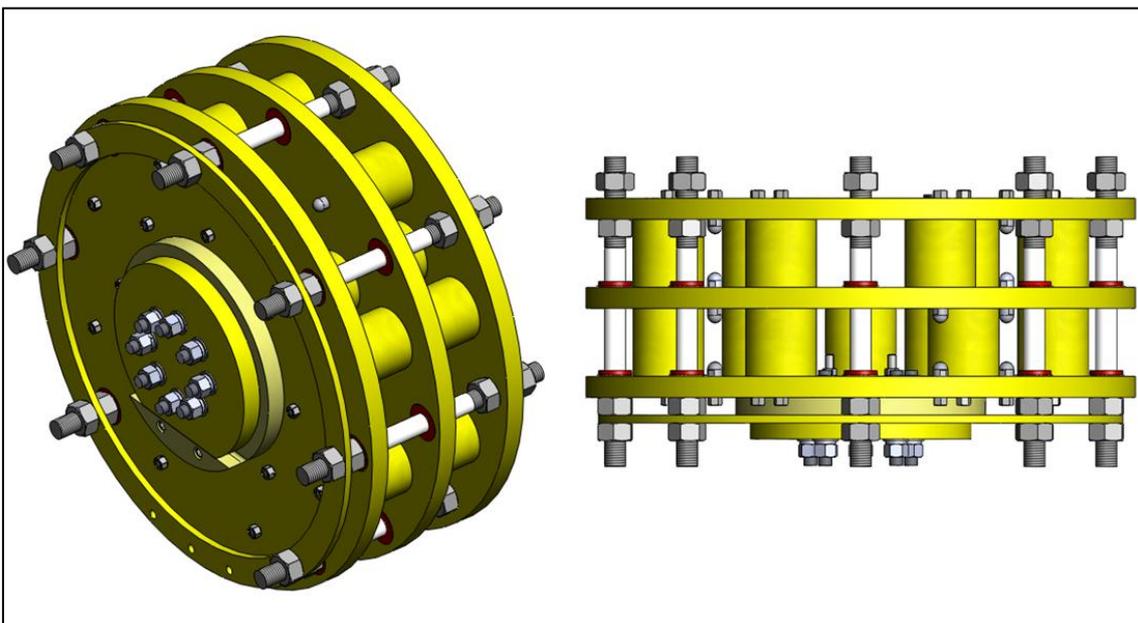


Figura 68 - Geometria final do módulo de compensação.

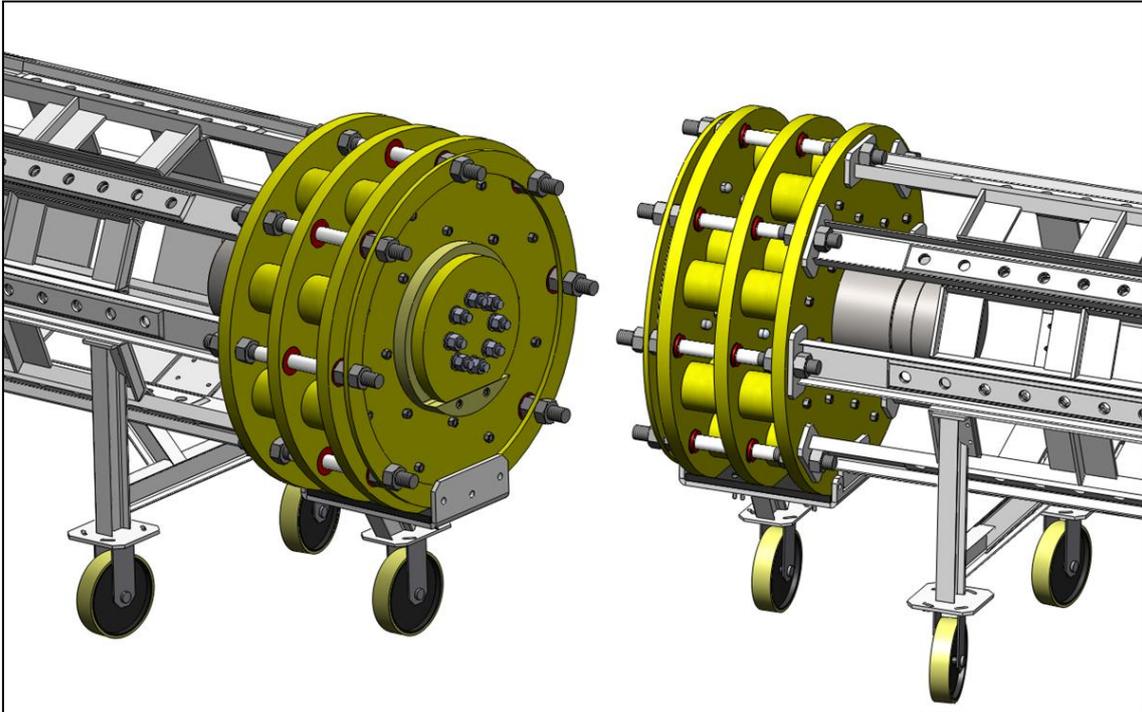


Figura 69 - Fixação do módulo de compensação na bancada de ensaios.



Figura 70 - Bancada de ensaios preparada para o ensaio experimental.

3.9.4 Seleção do número e geometria de molas

Tendo um sistema versátil de inúmeras combinações de montagem, fez-se necessário criar um método de seleção do número e geometria das molas. A estratégia adotada foi baseada em uma verificação experimental auxiliada por simulação numérica e rotina de programação.

O ensaio experimental foi realizado com a bancada de ensaios completamente montada. O conjunto de molas foi selecionado aleatoriamente. Após, o corpo de prova foi levado ao ângulo e carga axial máxima do ensaio (17° e 150ton). Através de um transdutor de posição linear acoplado ao módulo de compensação, foi possível registrar o deslocamento global do conjunto de molas. Conhecendo a área total das molas por camada, as propriedades mecânicas do material e o deslocamento promovido pelo ensaio experimental foi possível alimentar um modelo computacional de elementos finitos para determinar a força correspondente ao valor F_1 da Figura 66.

Com o carregamento axial atuante no módulo de compensação, a área de cada mola (150, 160 e 170mm), o nível de tensão de trabalho do material e a tolerância requerida foi possível elaborar uma rotina de programação destinada a seleção do número de molas. A Figura 71 detalha as geometrias das molas utilizadas na seleção.

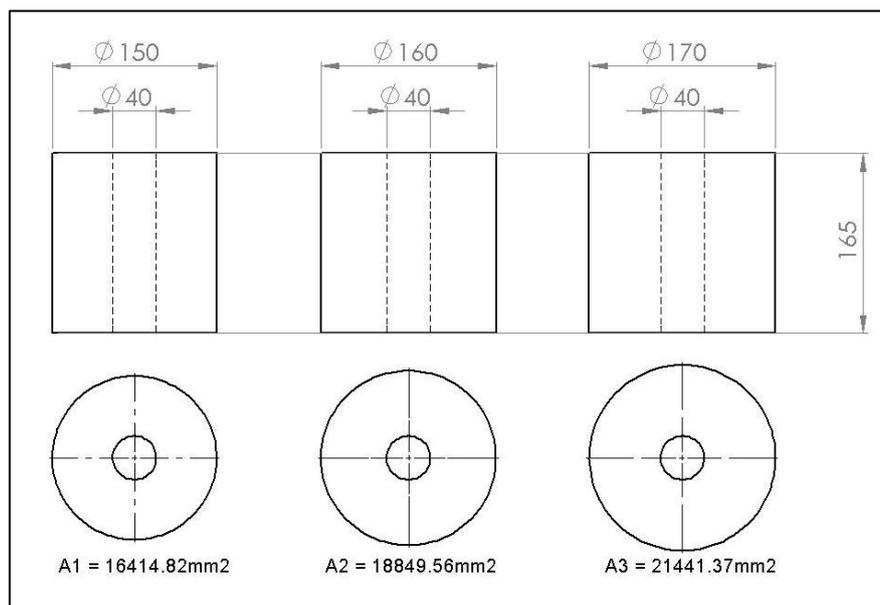


Figura 71 - Dimensões das três possíveis geometrias de molas.

4 RESULTADOS

4.1 MEDIÇÃO DE DUREZA

O durômetro manual, da escala *Shore A*, não apresenta precisão de medição alta. No entanto, de maneira qualitativa, as medidas de dureza realizadas nos corpos de provas confirmam o padrão de uniformidade das propriedades mecânicas entre os espécimes. A Figura 72 mostra o perfil de dureza variando entre $\pm 1\%$ dos 92 especificados ao fornecedor. Os resultados mostram uma variação na dureza desprezível para o projeto.

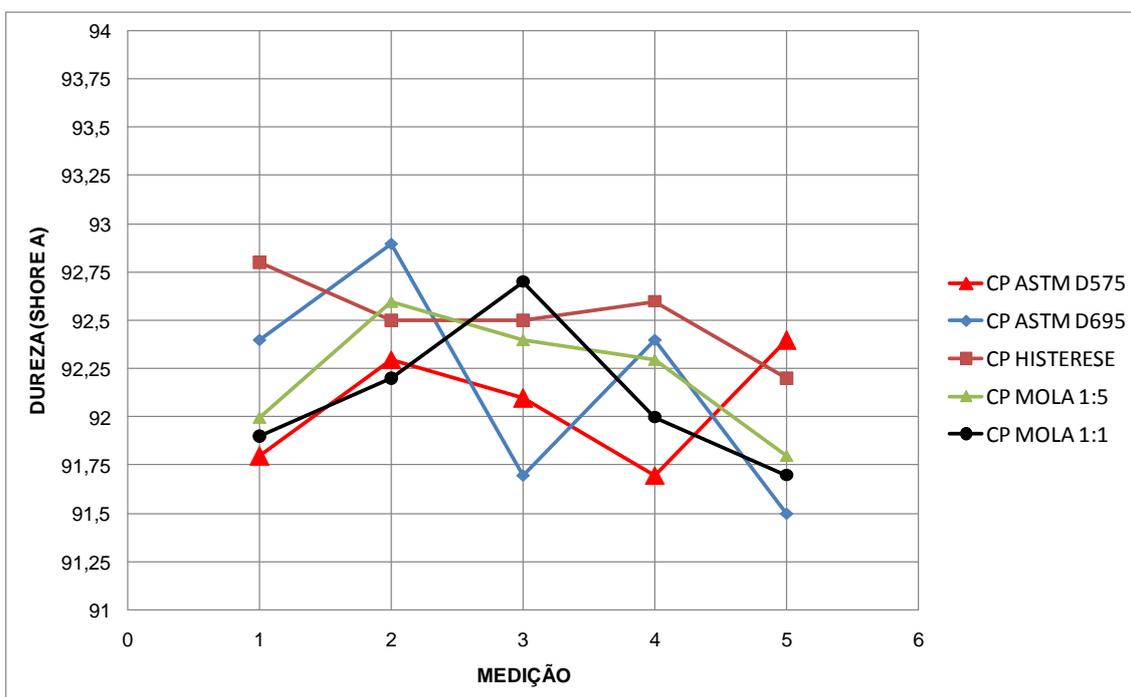


Figura 72 - Perfil de dureza nos espécimes para caracterização mecânica.

4.2 ENSAIOS DE COMPRESSÃO

4.2.1 ASTM D 695

O ensaio ASTM D695 apresenta condições de carregamento e de contato entre superfícies semelhantes à aplicação, mas, no entanto a geometria dos espécimes difere do projeto da mola devido à razão de aspecto entre diâmetro e altura. Em condições não ideais, como por exemplo, fora da máquina de ensaios, essa geometria provavelmente não apresentaria um bom

comportamento em fadiga, devido a sensibilidade à flambagem. A Figura 73 demonstra a flambagem de um espécime durante o ensaio de compressão. A pequena descentralização da amostra na máquina de ensaios provocou uma curvatura típica de flambagem. Assim, evidencia-se a necessidade de se preservar uma relação entre diâmetro e altura próximo da unidade, afim de que o projeto das molas seja bem sucedido.

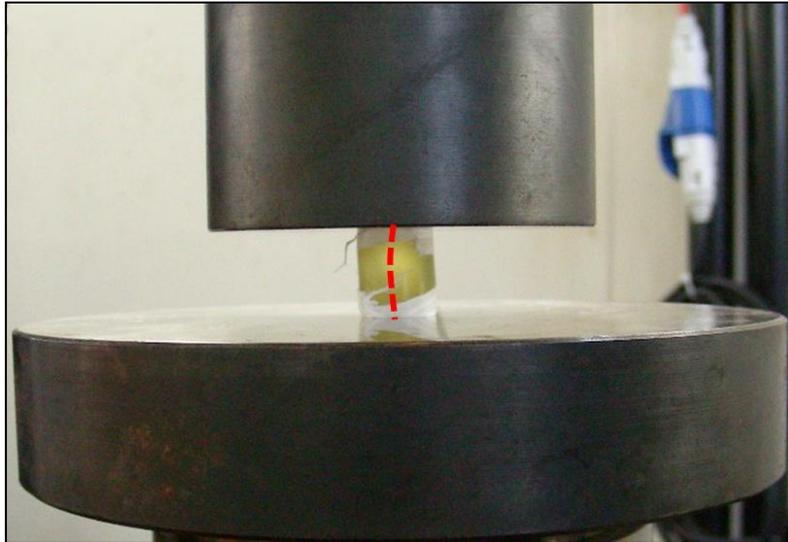


Figura 73 - Flambagem devido a falta de alinhamento.

O ensaio foi conduzido obedecendo aos parâmetros determinados pela norma. Após o ensaio de sete espécimes, três deles foram selecionados por melhor representarem o comportamento típico da amostragem e não apresentar flambagem.



Figura 74 - Ensaio de compressão ASTM D695 e espécimes ensaiados.

A Figura 74 mostra o ensaio sendo conduzido juntamente com os espécimes ensaiados. Já na Figura 75, as curvas tensão-deformação dos três espécimes selecionados são traçadas.

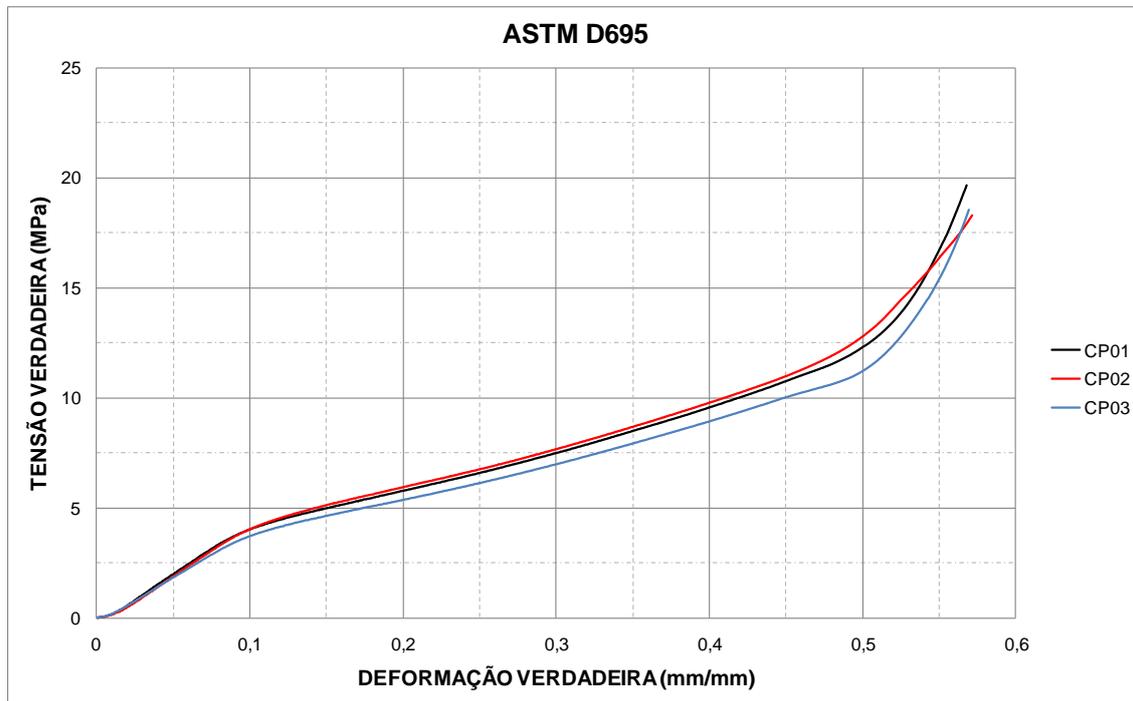


Figura 75 - Curva tensão-deformação no ensaio de compressão conforme a norma ASTM D695.

4.2.2 ASTM D 575

A norma ASTM D575 menciona a utilização de lixas d'água entre a amostra e os dispositivos, assegurando-se assim que o diâmetro do espécime, na seção de contato, permaneça constante durante o ensaio. Aplicando a condição de elevado atrito entre as superfícies, o efeito *Poisson* na seção em contato com a lixa é praticamente eliminado, resultando uma equivalência entre as curvas tensão-deformação verdadeira e de engenharia.

A Figura 76 apresenta a comparação das curvas de tensão-deformação, onde é considerada nos cálculos a área inicial (curva de engenharia) e área variável (curva verdadeira). Nota-se que as curvas permanecem praticamente sobrepostas até a deformação de 20%. Como no projeto das molas a deformação máxima de trabalho será de 20%, se valida o uso da curva de engenharia diretamente na calibração dos modelos computacionais.

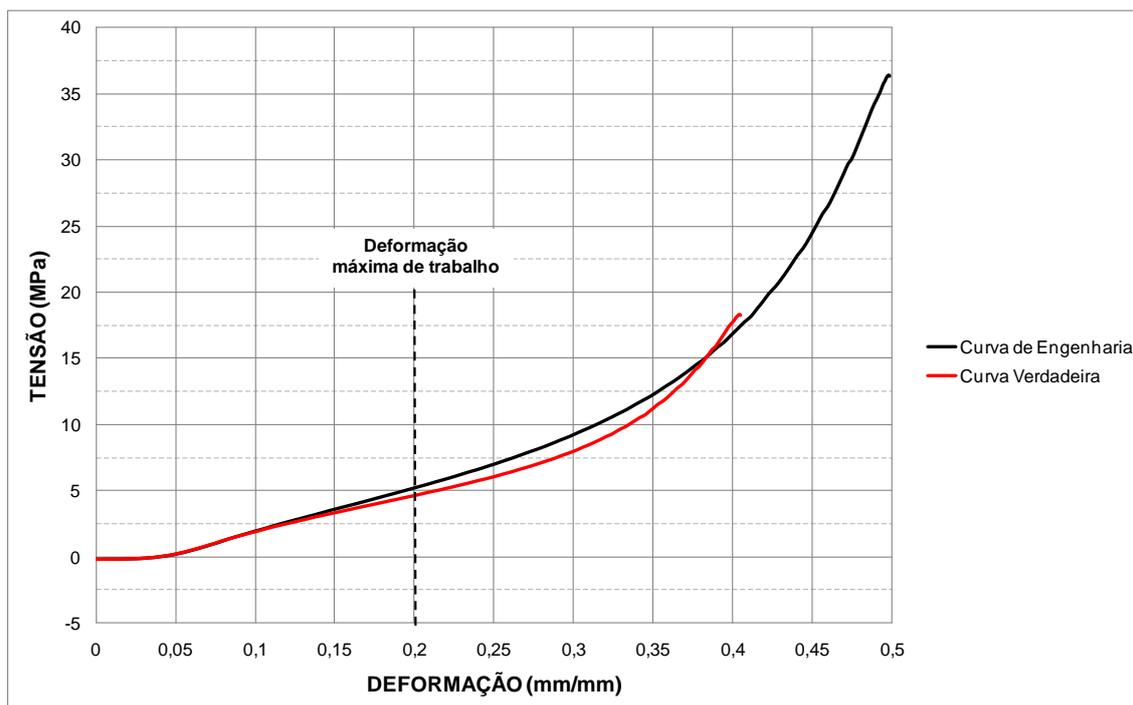


Figura 76 - Curva de tensão-deformação verdadeira e de engenharia durante o carregamento no ensaio de compressão.

De acordo com a norma D575, devem ser utilizadas lixas d'água com granulometria 400. No entanto, durante o primeiro ensaio, constatou-se o

escorregamento da amostra. O fato pode ser explicado pela elevada dureza, quando comparada com as borrachas comerciais, dos espécimes de poliuretano e também pela ciclagem de carregamento. Assim, os ensaios seguintes foram executados sem a presença de lixas e com lixas de granulometria 200. Os resultados, apresentados na Figura 77, geram um comparativo do efeito do atrito durante o ensaio de compressão. Nota-se que nos ensaios com lixas 200 a tensão atingiu valores superiores, pois a área de contato foi efetivamente restringida pela lixa. Já no ensaio sem a presença de lixas, o atrito entre o poliuretano e os pratos de aço não foi suficiente para reduzir a deformação radial nos espécimes. Como esperado, a curva referente ao ensaio com a lixa 400 permaneceu entre as duas condições, sem lixa e com lixa 200.

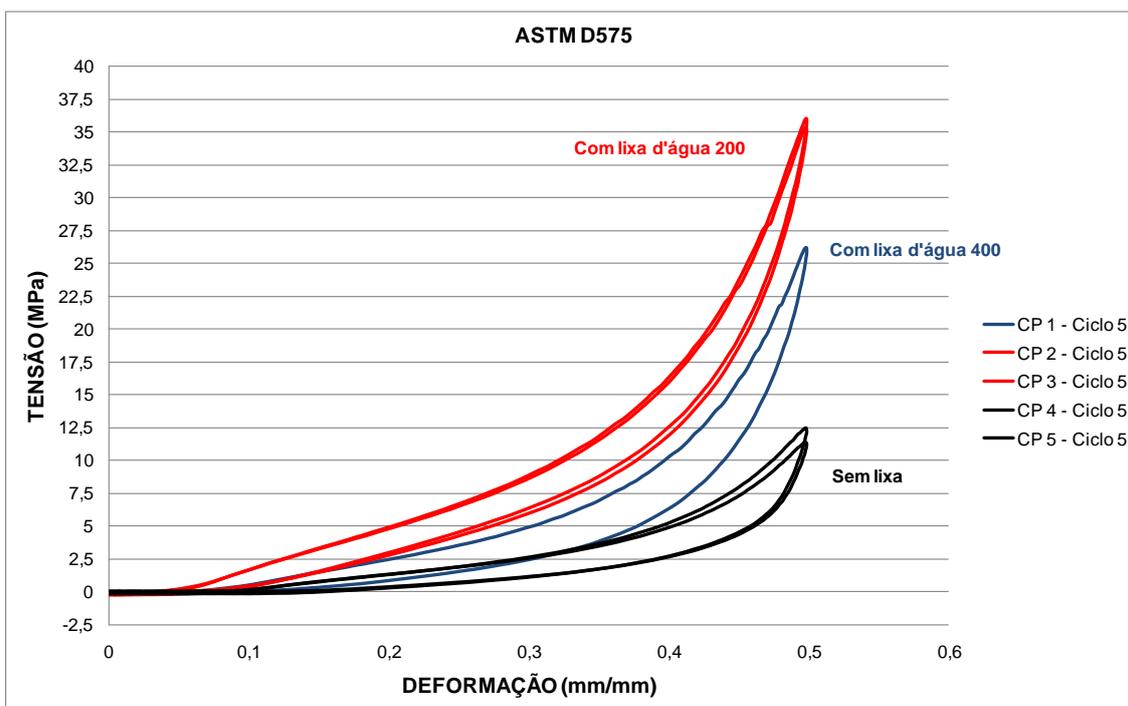


Figura 77 - Variação das curvas tensão-deformação de engenharia conforme a condição de contato com os pratos da máquina de ensaios.

A Figura 78 apresenta o posicionamento do espécime nos pratos da máquina de ensaios bem como o modo de utilização das lixas d'água.

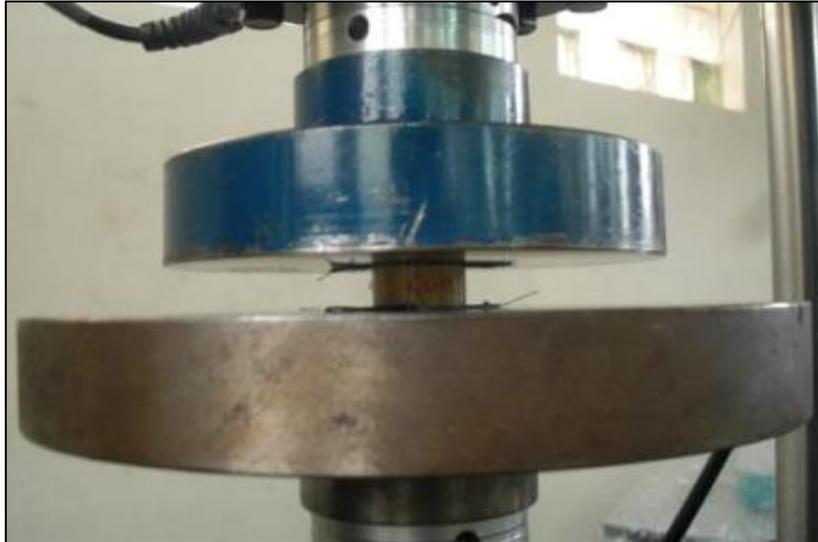


Figura 78 - Ensaio de compressão ASTM D575 com lixas entre o espécime e os pratos da máquina de ensaios.

Como descrito anteriormente, o propósito do uso de lixas entre o espécime e os pratos é a restrição da seção de contato. Logo, apenas os ensaios com a lixa 200 cumpriram o requisito. A Figura 79 apresenta as curvas referentes aos ciclos de compressão no ensaio com lixa 200.

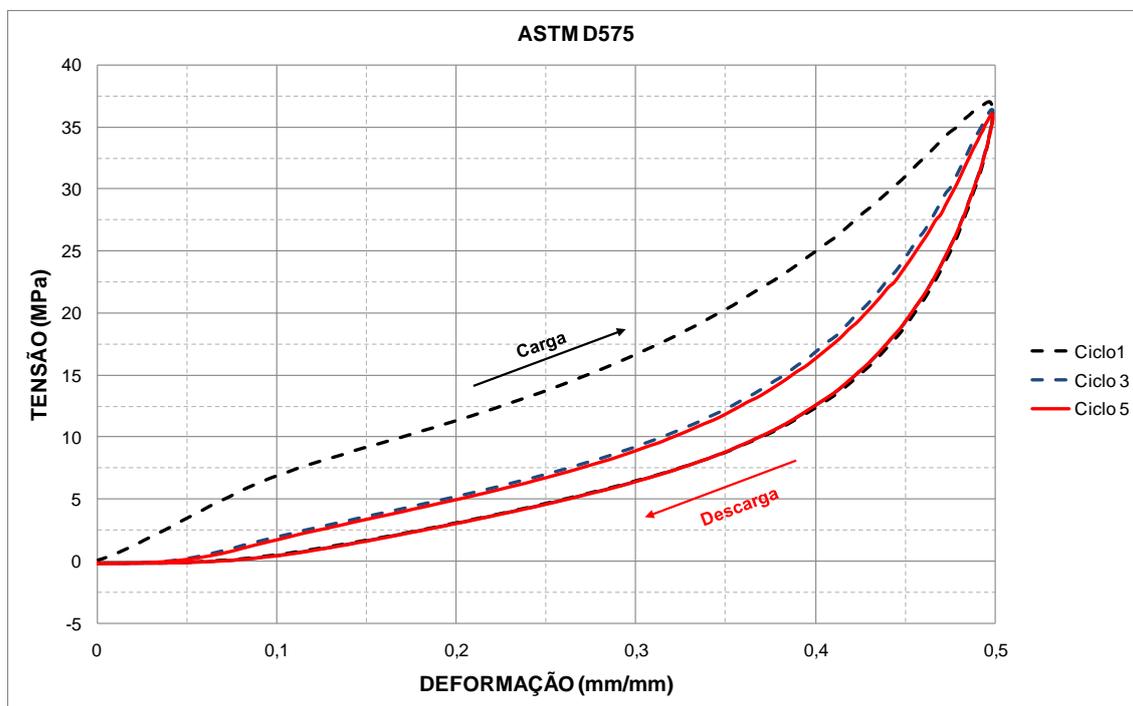


Figura 79 - Curva tensão-deformação em três ciclos de carregamento no espécime com lixa d'água 200.

4.2.3 Comparação entre os ensaios de compressão.

A Figura 80 apresenta uma comparação entre os ensaios de compressão de acordo com as normas ASTM D695 e D575. Analisando as duas curvas, as geometrias dos espécimes e condições de carregamento dos ensaios decidiu-se utilizar os resultados do ensaio ASTM D575 para a calibração dos modelos computacionais no projeto das molas.

Três fatores foram cruciais na escolha do ensaio de compressão ideal ao projeto: o ensaio D575 releva o efeito de amolecimento nos primeiros ciclos; a geometria dos espécimes apresenta fator de aspecto entre altura e diâmetro maior que 1, evitando flambagem; os resultados podem ser utilizados diretamente sem a necessidade de transformação da curva de engenharia para curva verdadeira.

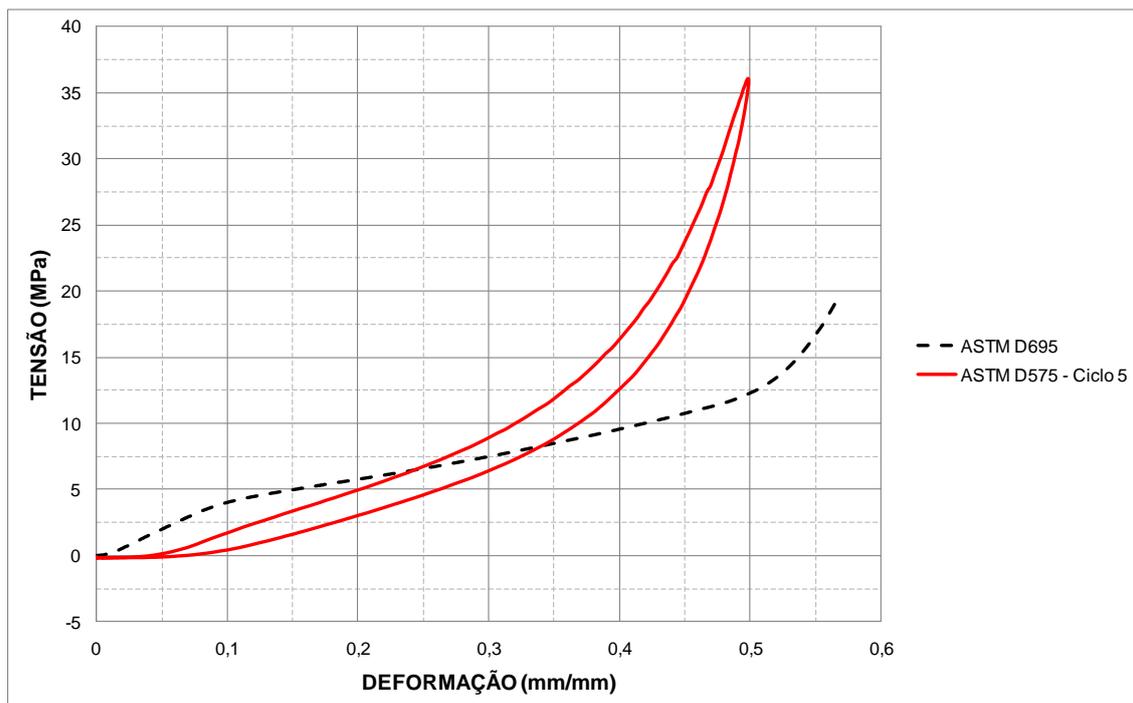


Figura 80 - Comparação entre os ensaios de compressão.

4.3 ENSAIO DE FADIGA EM COMPRESSÃO

4.3.1 Controle de Deslocamento

A Figura 81 e Figura 82 demonstram a variação da força de compressão com o deslocamento e o número de ciclos. Nota-se que para o limite inferior (mínimos) o elastômero de poliuretano apresenta comportamento estável, com decréscimo de aproximadamente 7% na força inicial. Já para o limite superior (máximos), o valor aumenta cinco vezes, chegando a 36%.

A explicação para o limite superior apresentar maior perda de rigidez está relacionada com o mecanismo de deformação e viscoelasticidade. Diversos modelos matemáticos tentam descrever o comportamento viscoelástico, dentre eles pode-se citar os modelos de Maxwell, Kelvin-Voigt, Burgers e Ladders. Alternativamente, os modelos de Maxwell e Kelvin-Voigt podem ser adaptados criando o dois modelos viscoelásticos de três parâmetros, visualizados na Figura 83, representando talvez os modelos mais representativos dentre os citados (Riande 2000).

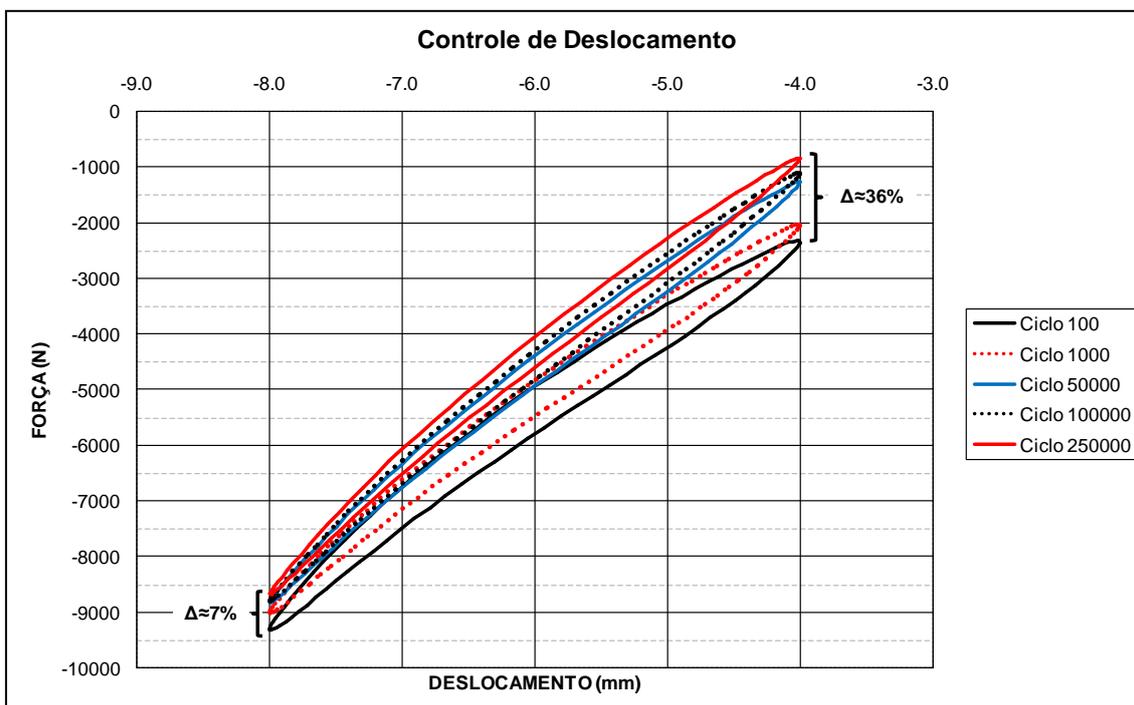


Figura 81 - Laços de histerese com controle de deslocamento.

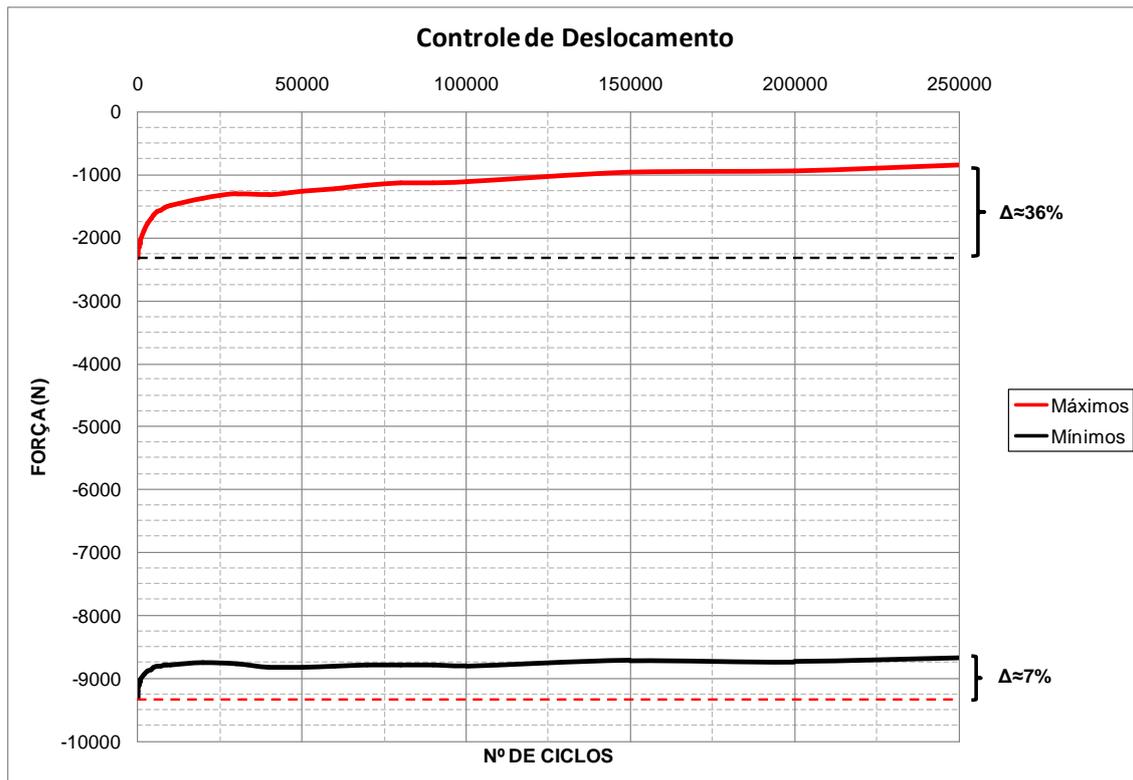


Figura 82 - Máximos e mínimos do ensaio de histerese com controle de deslocamento.

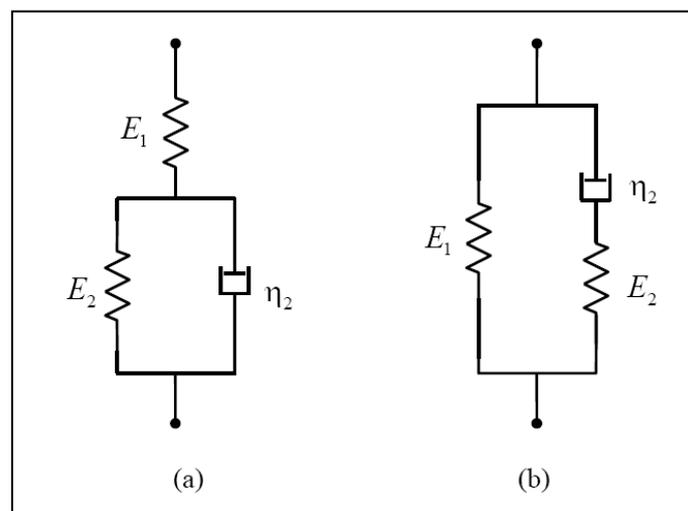


Figura 83 - Modelos viscoelásticos de três parâmetros.

Ao aplicar o carregamento, o material responde instantaneamente regido pela rigidez linear das molas. Subseqüente, a deformação continuará a aumentar, porém a uma taxa decrescente devido à ação não-linear do amortecedor. Depois que o carregamento é removido, uma parcelada da

deformação, relativa às molas, é recuperada imediatamente, enquanto a outra parcela relativa ao amortecedor é lentamente recuperada ao longo do tempo. Assim, no ensaio, não há um período de tempo suficiente durante o término e início de outro ciclo para que o limite superior recupere-se totalmente.

4.3.2 Controle de Força

O ensaio de fadiga, controlado por força é mais representativo que o controlado por deslocamento, pois se assemelha ao modo de carregamento utilizado na bancada de ensaio do *Bend Stiffener*. Os resultados, apresentados pela Figura 84 e Figura 85, mostram um decaimento de propriedades mecânicas, sendo levemente maior que no ensaio por deslocamento. Essa diferença refere-se, principalmente, ao maior número de ciclos executados no ensaio.

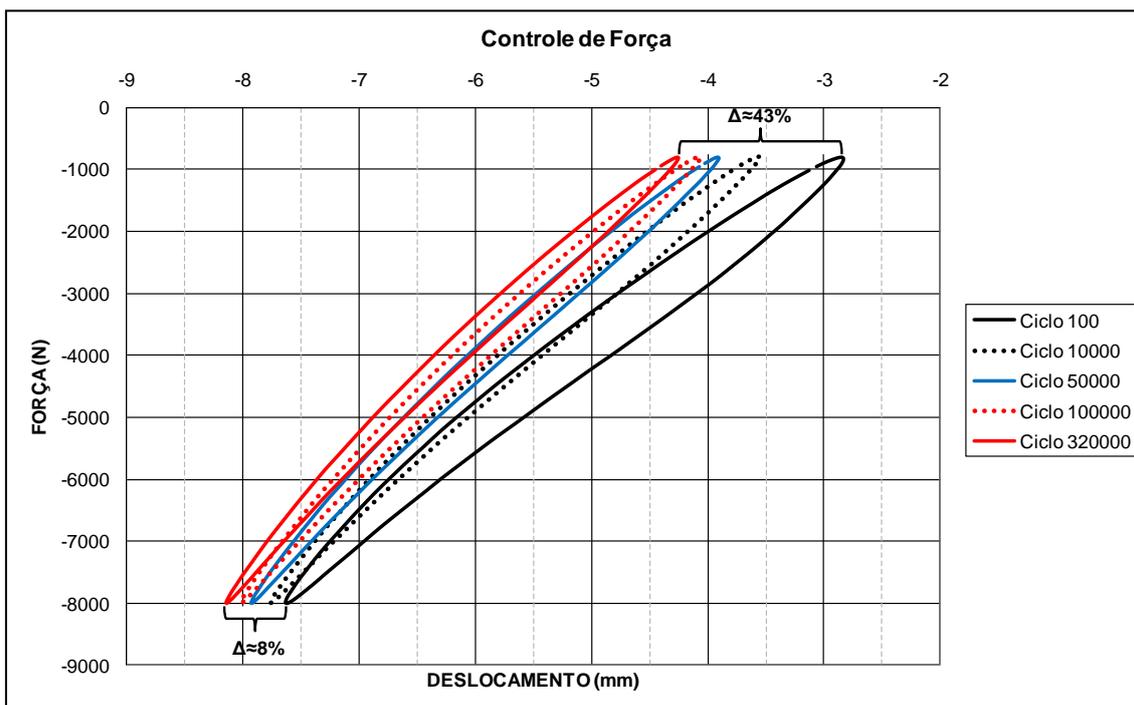


Figura 84 - Laços de histerese com controle de força.

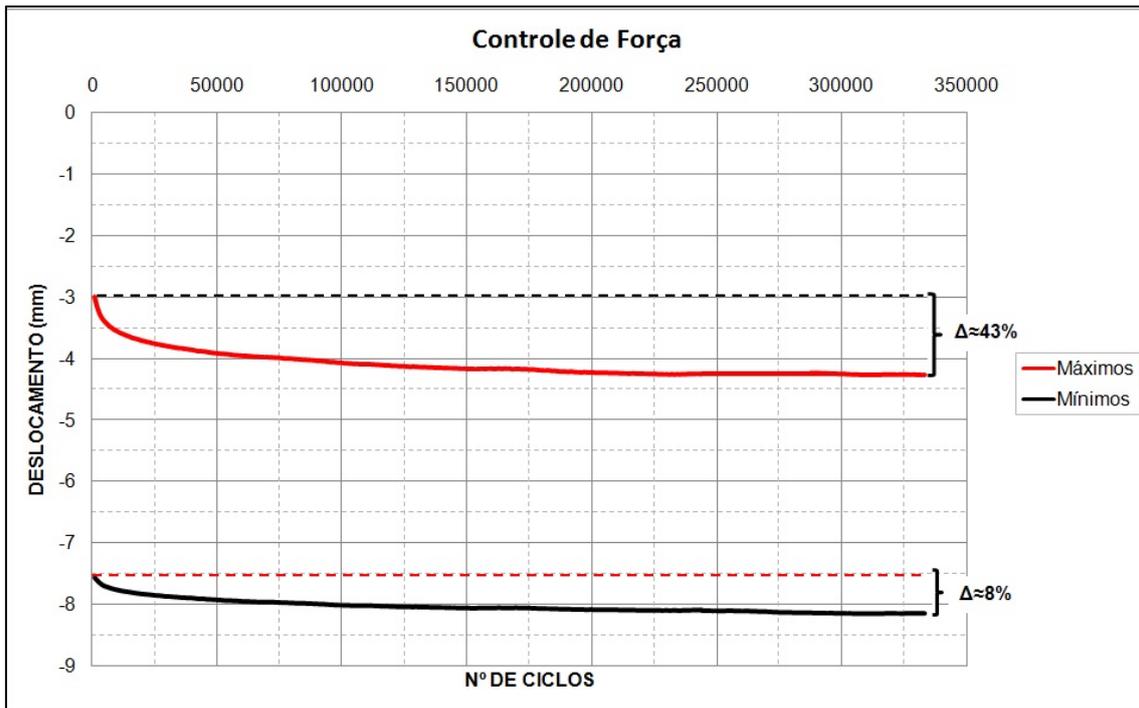


Figura 85 - Máximos e mínimos do ensaio de histerese com controle de força.

4.4 SELEÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL

A curva obtida no ensaio de compressão ASTM D575, com o uso de lixas 200, foi selecionada como padrão de calibração dos modelos computacionais hiperelásticos. A Figura 86 apresenta a curva de carregamento utilizada.

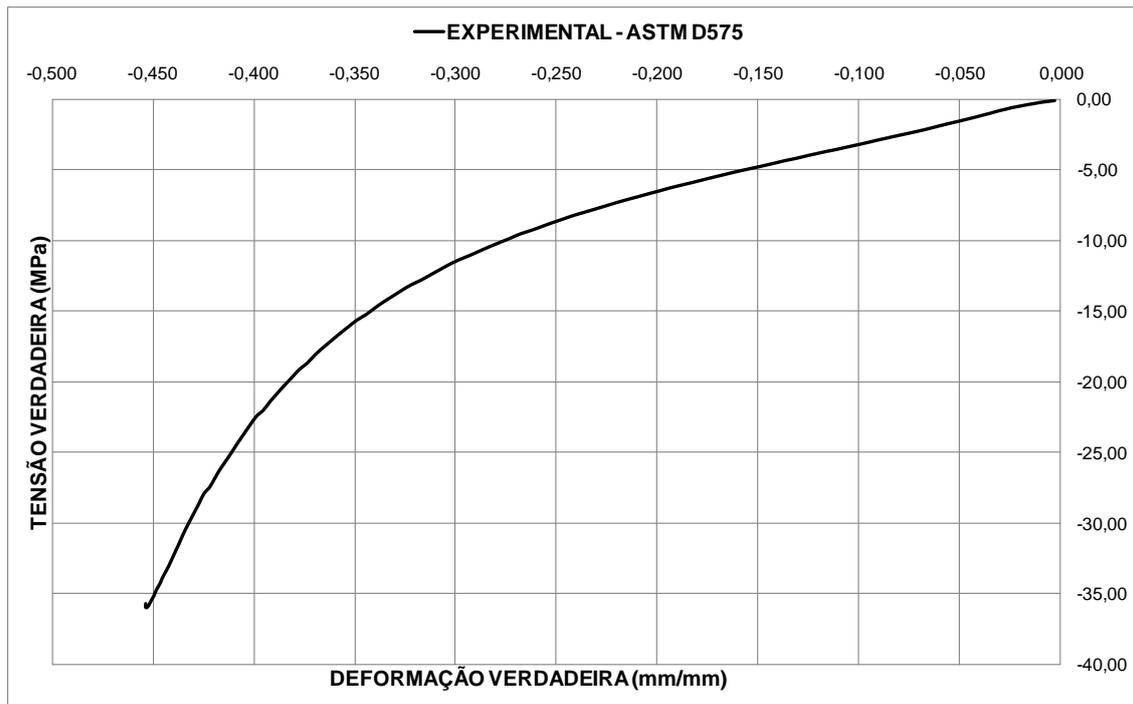


Figura 86 - Curva de calibração dos modelos hiperelásticos.

Os dados de tensão e deformação verdadeira são carregados no software e, após a seleção dos modelos constitutivos de hiperelasticidade, a análise computacional é iniciada.

Tabela 6 - Erro dos modelos constitutivos hiperelásticos.

Modelo Constitutivo Hiperelástico	Erro Normalizado	Valor de R^2
Arruda-Boyce	5,608593201	0,996679482
Ogden, N=2	2,279776435	0,999520399
Ogden, N=3	2,112315779	0,999553295
Ogden, N=6	0,486532887	0,99995725
Neo-Hookeano	18,85743122	0,953151258
Mooney-Rivlin	6,322082232	0,996438498
Polinomial, N=2	0,686070888	0,999956148
Yeoh	1,068677654	0,999896254

A Tabela 6 apresenta o valor dos erros normalizado e R^2 , onde dois modelos são destacados, Ogden N=6 e Polinomial N=2, por apresentarem ajuste adequado ao ensaio experimental. A Figura 87 mostra as curvas de ajuste de cada modelo.

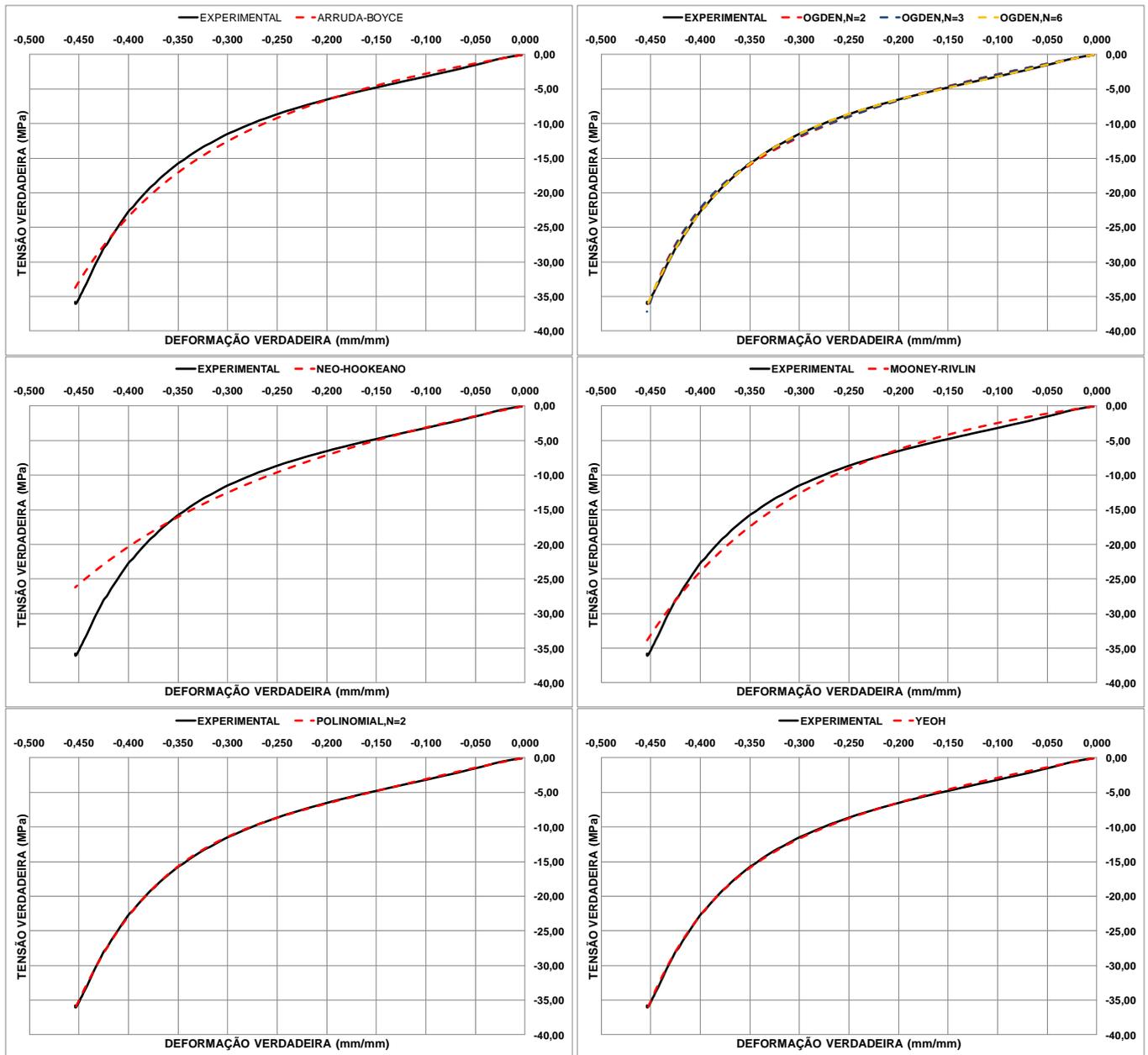


Figura 87 - Curvas de ajuste dos modelos computacionais utilizados.

O modelo de Ogden de sexto grau demonstrou-se mais efetivo no ajuste aos dados experimentais, porém sua formulação complexa demanda excessivo tempo computacional. Logo, o modelo selecionado para representar o comportamento do poliuretano nos cálculos computacionais foi o modelo polinomial de segundo grau.

4.4.1 Validação do modelo hiperelástico

O ensaio de compressão foi realizado e comparado com a simulação computacional calibrada com as constantes do modelo constitutivo

hiperelástico polinomial de segundo grau. A Figura 88 apresenta o campo de deslocamento aplicado no espécime. Nota-se o embarramento comum a esse tipo de ensaio e geometria.

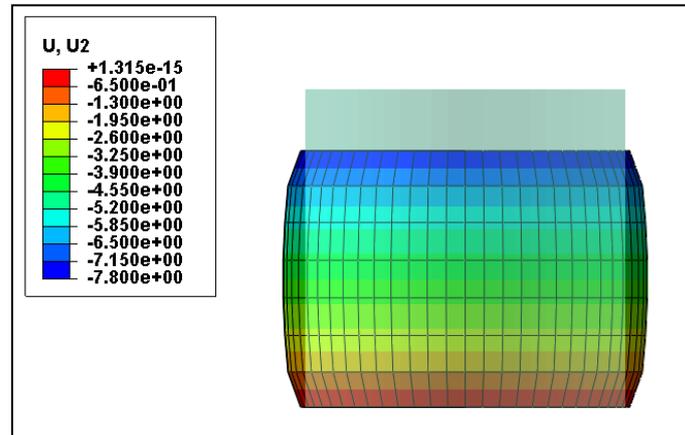


Figura 88 - Campo de deslocamento utilizando o modelo polinomial de segundo grau.

A Figura 89 exibe um comparativo entre o modelo polinomial e o experimento.

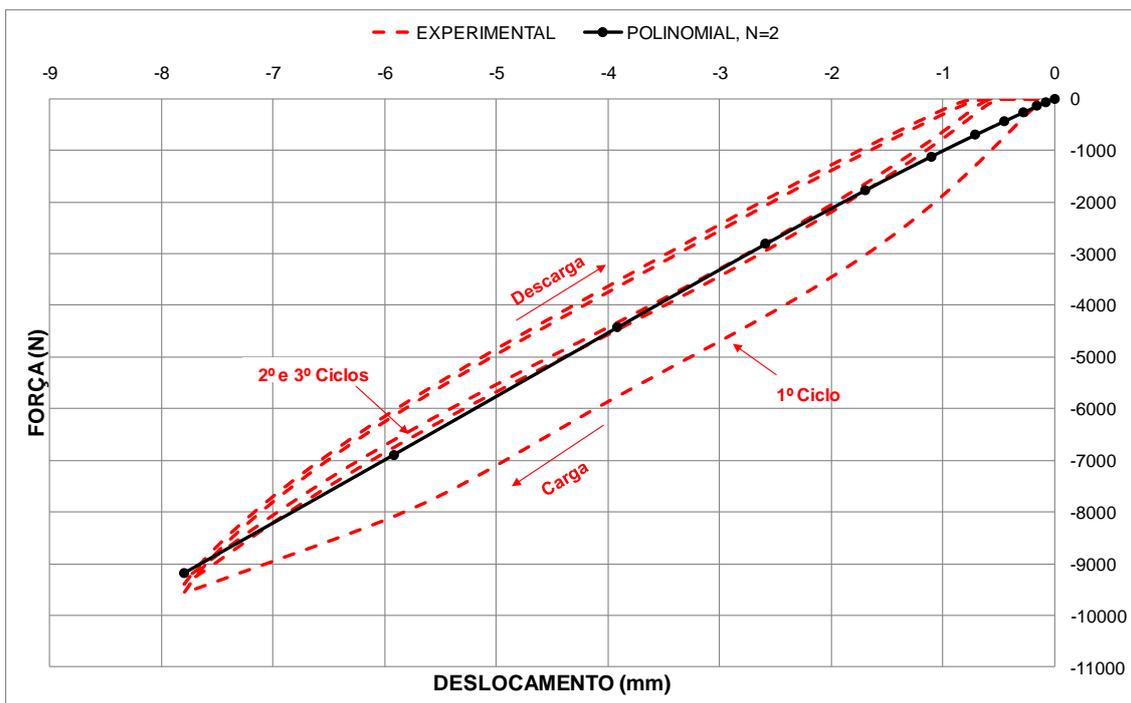


Figura 89 - Validação do modelo computacional selecionado.

O modelo polinomial foi calibrado utilizando apenas a condição de carregamento, desconsiderando-se, portanto, a curva de descarga. Os resultados dos comparativos demonstram a excelente adaptação do modelo

polinomial ao material, validando o seu uso no projeto das molas de poliuretano.

4.5 CARACTERIZAÇÃO DA MOLA EM ESCALA 1:5

Os resultados apresentados são referentes aos espécimes com dimensões em escala 1:5 da mola utilizada no projeto. Três configurações de ensaios foram utilizadas na caracterização: ensaios cíclicos com diferentes amplitudes e taxas de carregamentos, ensaio de relaxação com patamares de carregamento e ensaio de fadiga em compressão.

4.5.1 Ensaios cíclicos de compressão

As figuras a seguir mostram o comportamento do material sob diferentes amplitudes de taxas de deformação obtidas em ensaios cíclicos de aplicação e retirada de carga em compressão. Apenas o último ciclo de cada ensaio foi traçado. Os resultados encontrados remetem aos estudos de Bergstrom onde quanto maior a taxa de carregamento maior é a tensão alcançada (Bergstrom and Boyce 1998).

Na Figura 90, a condição com amplitude máxima de 10% é apresentada. O valor máximo de tensão chega a ser 32,5% maior entre as frequências de 0,1 e 0,2Hz, o que evidencia a elevada dependência do material a taxa de deformação nesta amplitude.

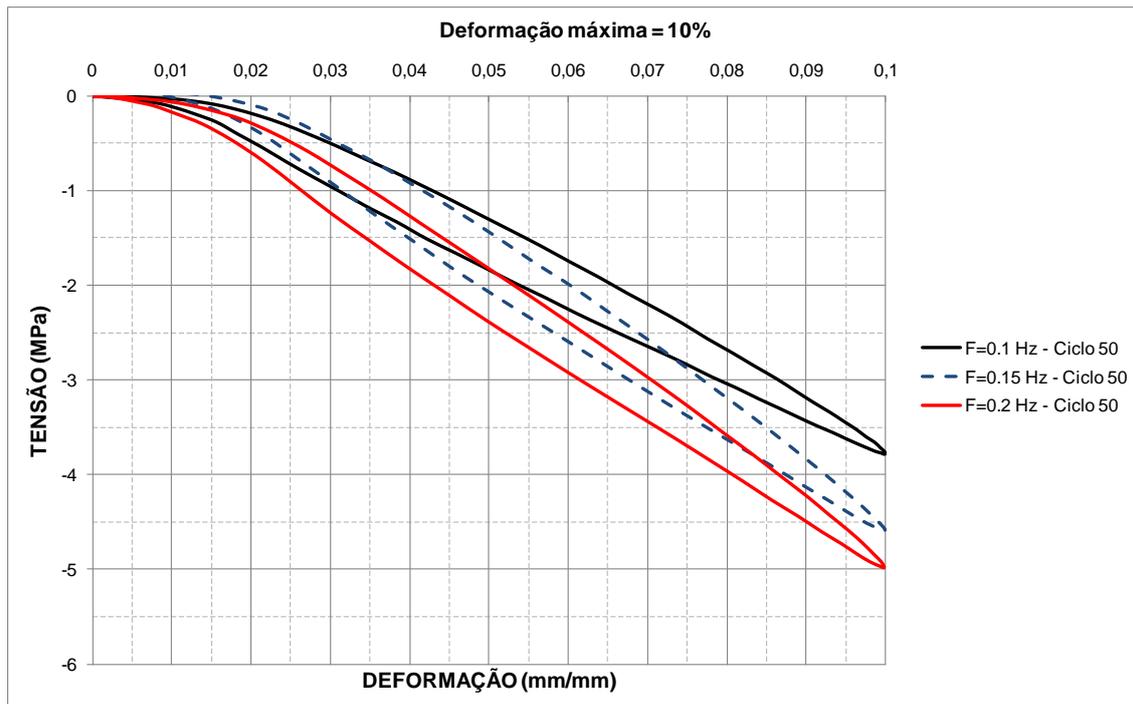


Figura 90 - Ensaio com amplitude de 10% de deformação.

Já nas amplitudes de 15 e 20%, Figura 91 e Figura 92, a dependência da taxa de carregamento não ultrapassa 7% de diferença entre as tensões máximas.

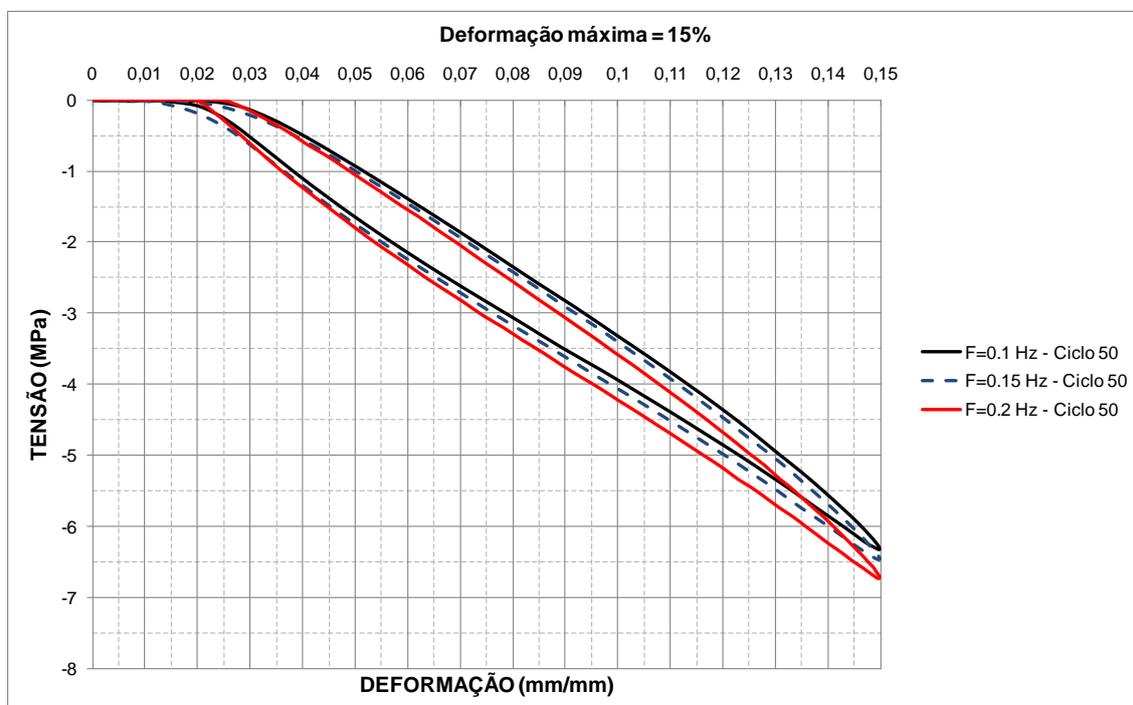


Figura 91 - Ensaio com amplitude de 15% de deformação.

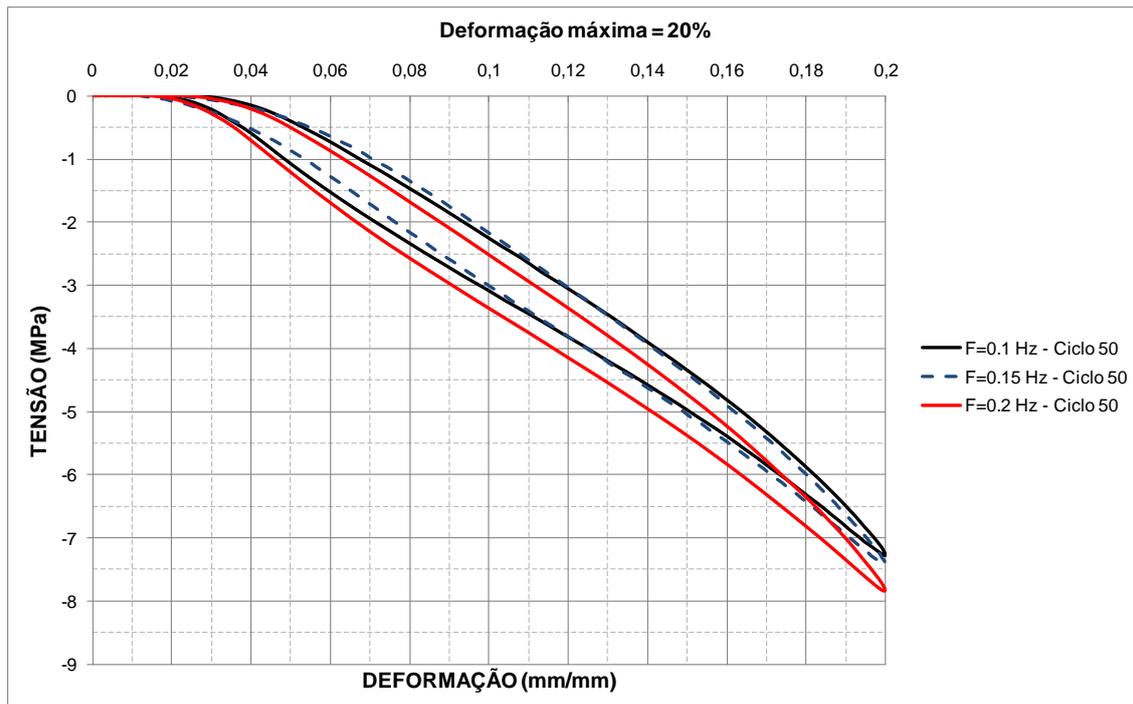


Figura 92 - Ensaio com amplitude de 20% de deformação.

As nove curvas são traçadas na Figura 93. Nota-se a defasagem no eixo de deformação, que é mais acentuada nos ensaios de 20% de deformação máxima, devido à deformação permanente gerada pelas altas deformações.

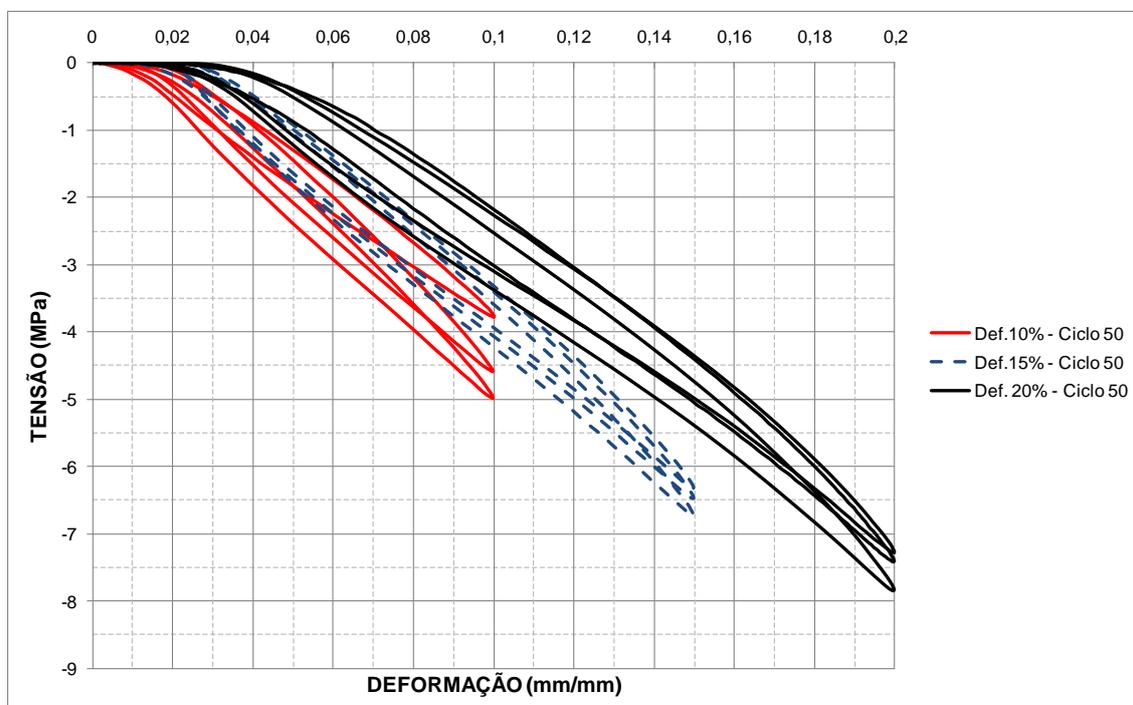


Figura 93 - Comparativo entre as três amplitudes de deformação.

4.5.2 Ensaio Patamar de Carregamento

Os ensaios de relaxação com patamares de carregamentos foram realizados com três taxas de deformação (0.02, 0.03 e 0.04/s) e com 60s de intervalo a cada incremento de 5% de deformação. Os resultados mostram como o material poderá se comportar caso haja alguma interrupção do teste.

O espécime ensaiado na taxa de deformação de 0.03/s apresentou propriedades mecânicas desuniformes com os demais. Condições de fabricação podem ter interferido no corpo de prova. A Figura 94 apresenta o perfil de carregamento aplicado nos três espécimes.

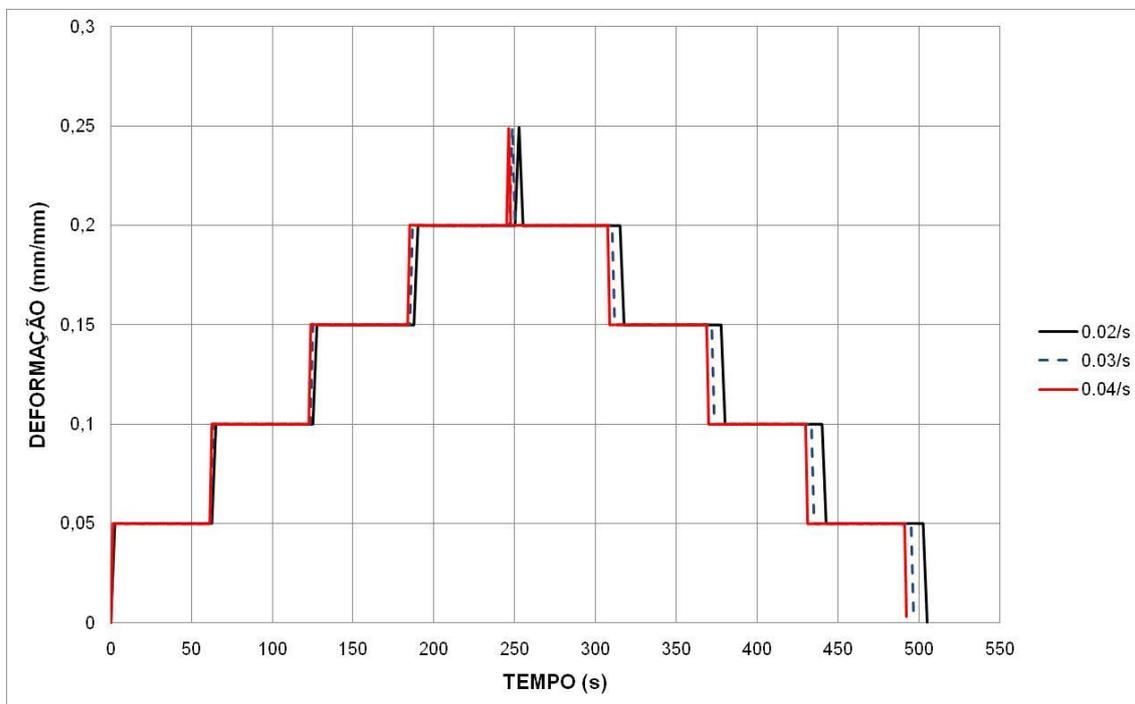


Figura 94 - Perfil de carregamento.

Na Figura 95 a variação de tensão é registrada com o avanço do tempo. Nas interrupções realizadas durante a aplicação de carga a tensão decresce, registrando a acomodação das moléculas ou relaxação. Já nos intervalos durante a retirada de carga, nota-se o contrário, a tensão aumenta. Fenômeno também evidenciado nos estudos de Bergstrom (Bergstrom and Boyce 2000).

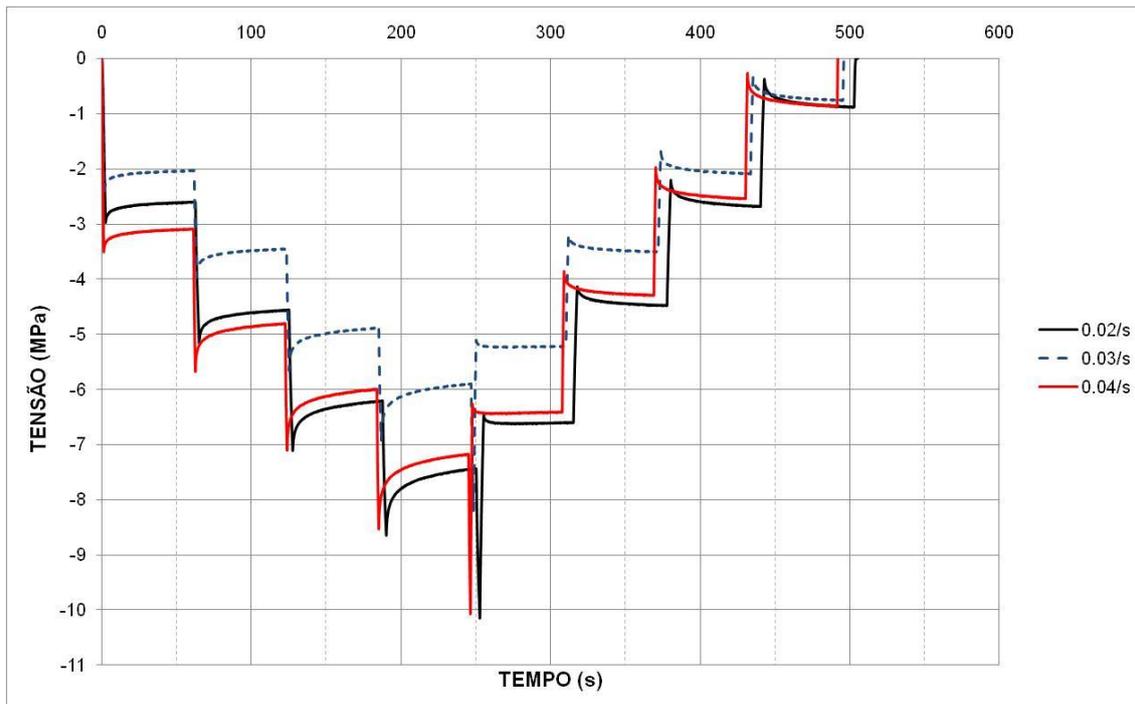


Figura 95 - Variação da tensão com o tempo.

As curvas tensão-deformação dos ensaios são apresentadas na Figura 96. Os resultados mostram a tendência de uma curva de equilíbrio para tempo de relaxação tendendo ao infinito.

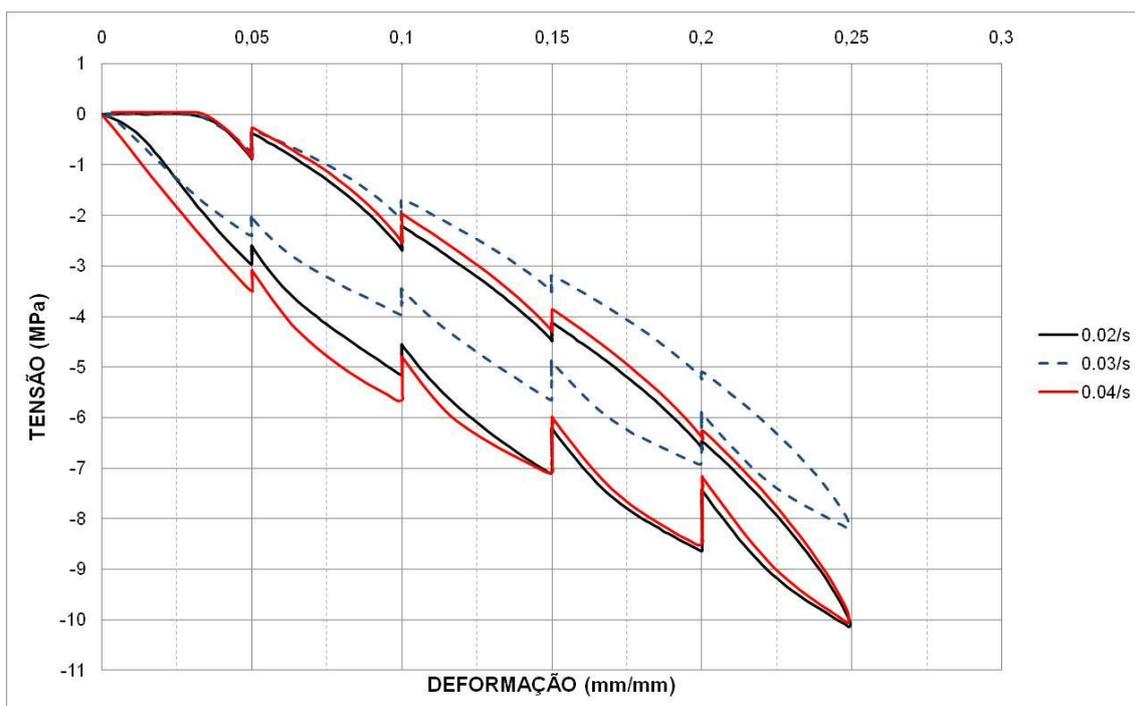


Figura 96 - Curvas de tensão-deformação com intervalos de relaxação.

4.5.3 Ensaio de fadiga em compressão na mola 1:5

O ensaio de fadiga em compressão na mola alcançou 745.000 ciclos. Porém, por se tratar de um ensaio de longa duração algumas interrupções ocorreram após o ciclo 70.000. Na Figura 97, as setas mostram pelo menos três interrupções geradas por queda de energia. As paradas são suficientes para a recuperação de uma parcela de rigidez nas molas. Eventualidades, como a parada do ensaio, devem ser catalogadas e consideradas no projeto para que deslocamento do módulo de compensação permaneça dentro dos limites de tolerância.

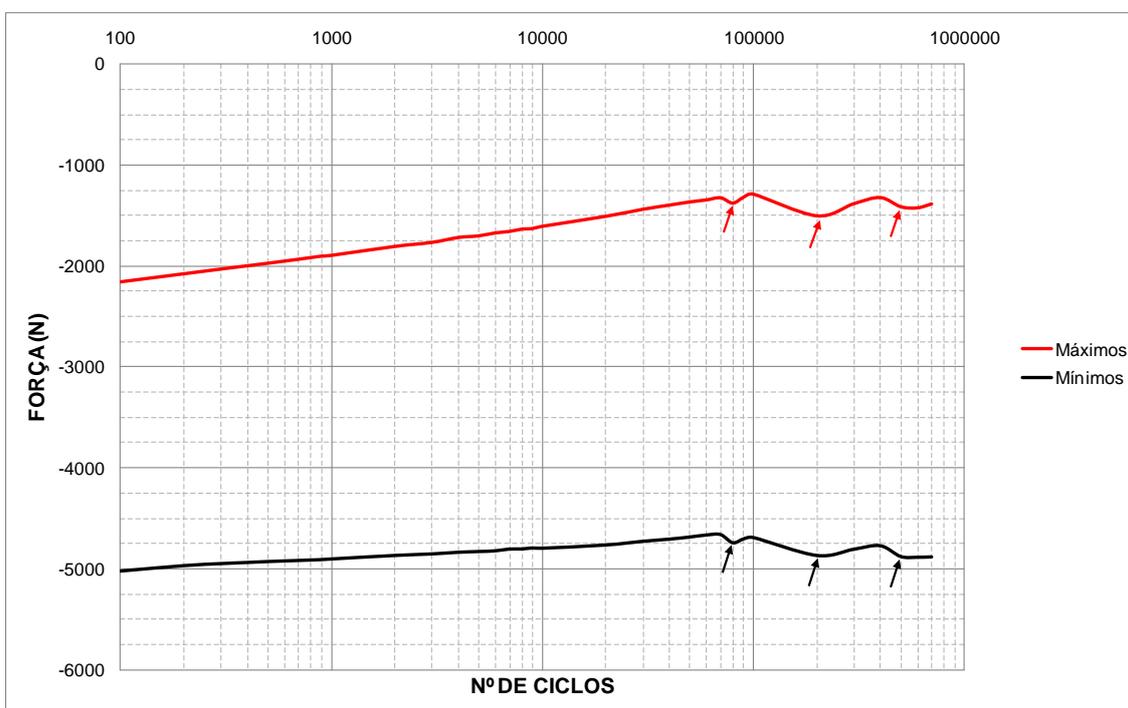


Figura 97 - Curvas de máximos e mínimos do ensaio de compressão.

A Figura 98 apresenta ciclos de histerese realizados em diferentes etapas do ensaio antes das interrupções. Até o ciclo 100.000, a mola registrou perda de rigidez, para o limite mínimo, de aproximadamente 9%. Valor maior ao encontrado nos ensaios de histerese realizados anteriormente. A geometria da mola pode ter ocasionado essa elevação da perda de rigidez.

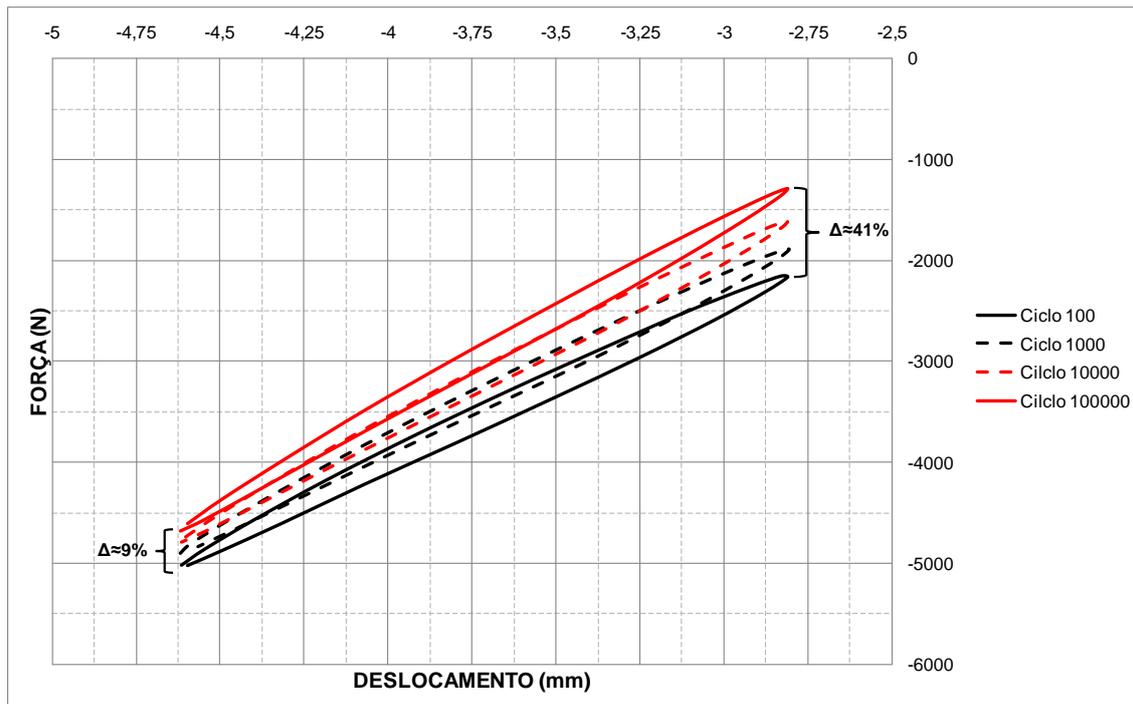


Figura 98 - Ciclos de histerese no ensaio de fadiga em compressão.

4.6 ENSAIO DE COMPRESSÃO DA MOLA EM ESCALA REAL

O ensaio de compressão foi realizado para estudar o comportamento da mola em escala real. A Figura 99 mostra o campo de deslocamento obtido da simulação computacional com o modelo polinomial de segundo grau.

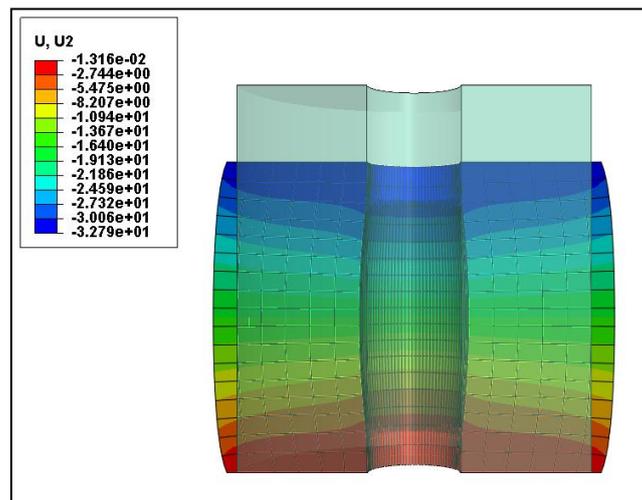


Figura 99 - Campo de deslocamento no ensaio de compressão com a mola em escala real.

Já a Figura 100 apresenta o comparativo dos resultados obtidos na simulação com os do experimento. O modelo polinomial continua apresentando um bom ajuste na condição do ensaio, validando mais uma vez o a calibração computacional.

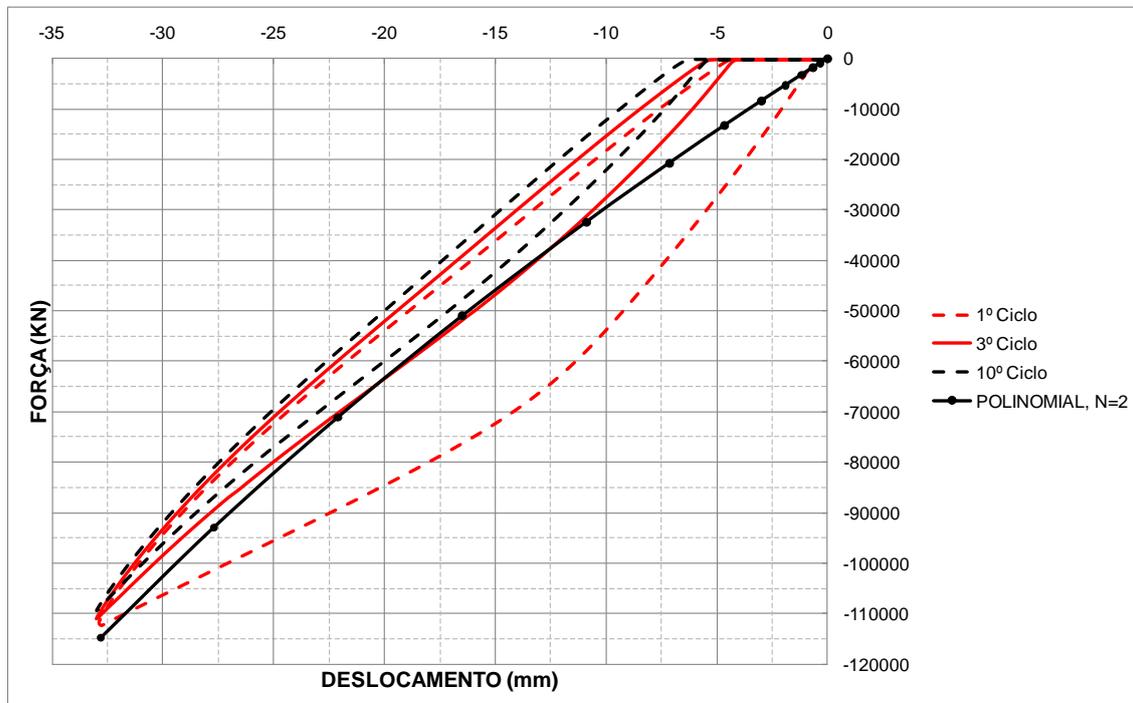


Figura 100 - Curvas força-deslocamento do ensaio e da simulação.

4.7 MÓDULO DE COMPENSAÇÃO EM ESCALA 1:5

Através do estudo em escala do módulo de compensação, foi possível compreender o comportamento do conjunto, além de obter mais informações sobre as molas. Dúvidas como de rigidez das chapas e guias, do atrito das buchas de deslizamento, atrito entre molas e chapas, comportamento das molas em série e em paralelo e por fim validar o conceito.

As forças máximas e mínimas do ensaio foram avaliadas através do modelo computacional apresentado na Figura 101. O modelo não chega a contemplar o amolecimento primário das molas e estipula valores de atrito estático e dinâmico. As molas dimensionadas para deformações de 15% teriam deslocamento total de 9,9mm. Aplicando a tolerância de 10%, temos que os limites admissíveis para o deslocamento máximo ficam entre $-9,9 \pm 0,9$ mm. No

modelo computacional, a força mínima (-49,4kN), correspondente a tensão de 4,8MPa nas molas, gera um deslocamento de -9,145mm. Valor este situado na faixa de tolerância estipulada.

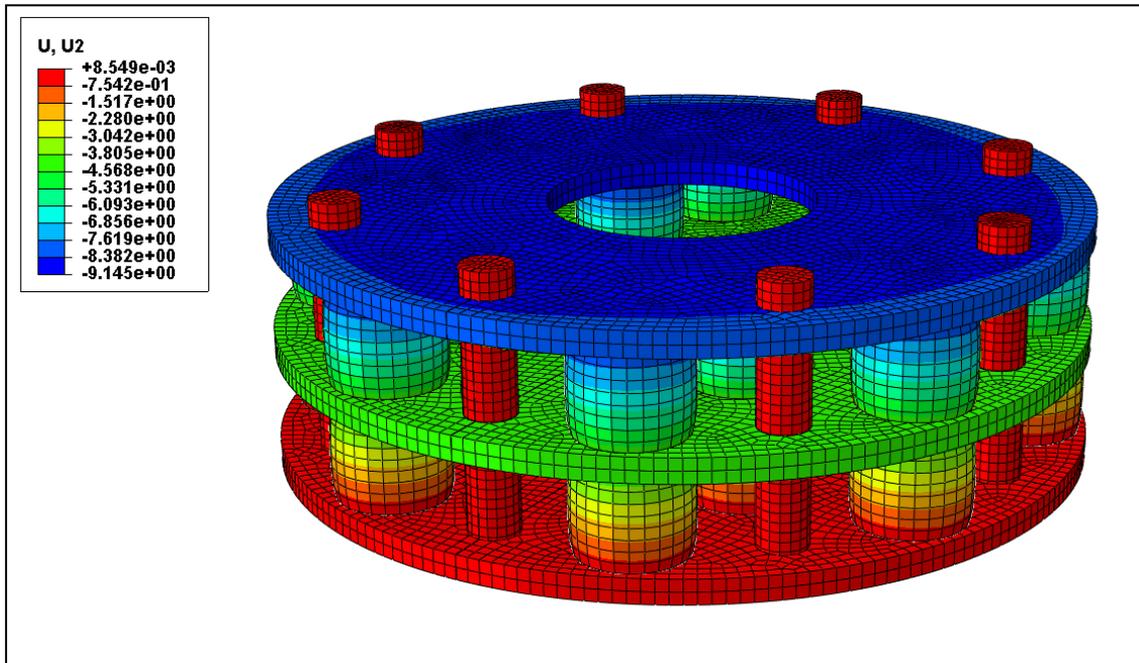


Figura 101 - Modelo computacional para determinação dos blocos de carregamento.

Na Figura 102, o modelo em escala é apresentado quando em deslocamento máximo de compressão.

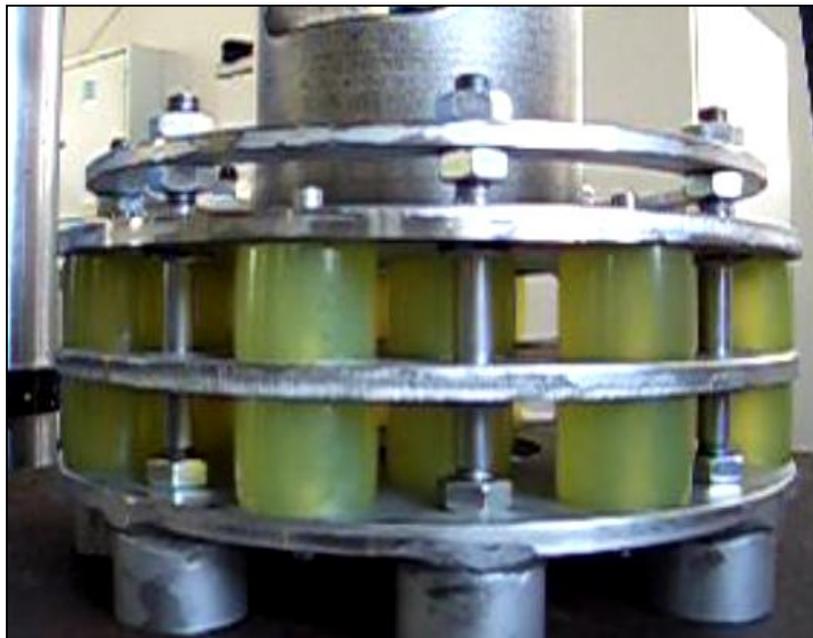


Figura 102 - Modelo em escala com amplitude máxima de deslocamento em compressão.

Já na Figura 103, as curvas do ensaio cíclico de compressão do protótipo são apresentadas. Nota-se que o deslocamento mínimo inicia na faixa de -8,6mm, o que se difere dos -9,145mm encontrados na simulações. Esta diferença pode ser explicada por fatores não-lineares desconsiderados na simulação, como por exemplo, os atritos do conjunto e a taxa de carregamento.

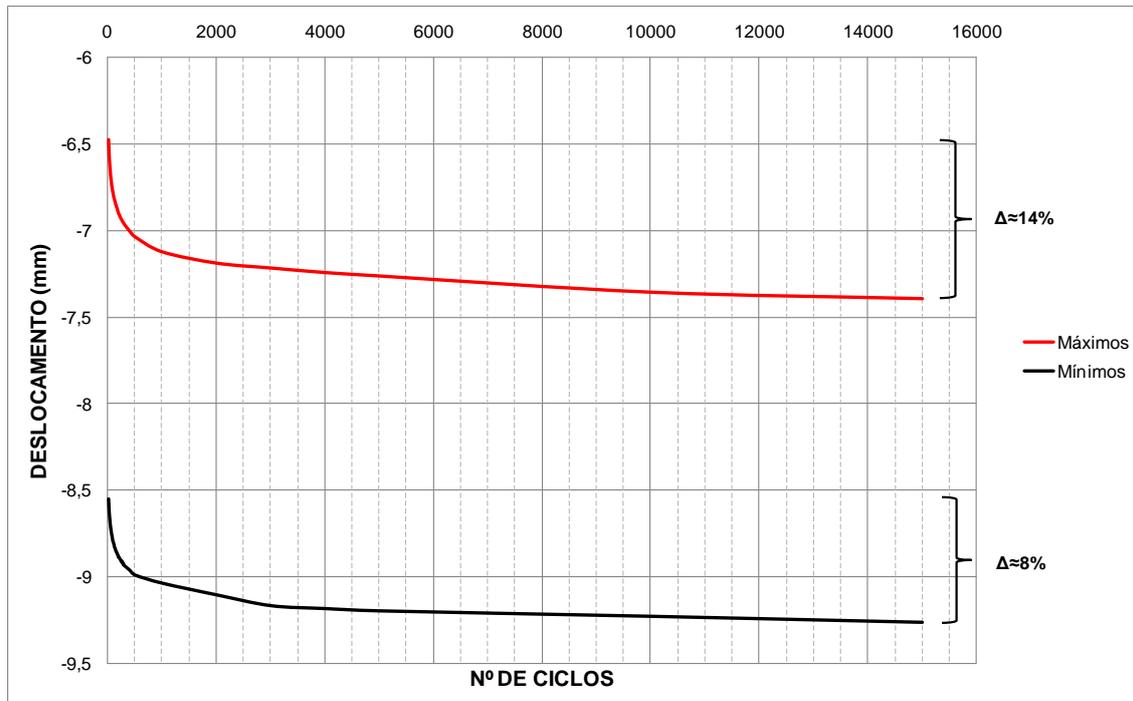


Figura 103 - Curva de máximos e mínimos do ensaio do protótipo.

Em menos de 500 ciclos, o deslocamento mínimo entra nos limites de tolerância. Também é perceptível a perda acentuada de rigidez do conjunto nos primeiros ciclos, e conseqüente estabilidade.

Por fim, analisando dados do ensaio foi possível validar o conceito. Obviamente é necessário analisar condições de atrito, taxas de carregamento, tolerâncias de ensaio, amolecimento primário das molas. No entanto, estas variáveis podem ser corrigidas pela versatilidade do sistema com diferentes geometrias e números de molas.

4.8 MÓDULO DE COMPENSAÇÃO EM ESCALA REAL

Depois de inúmeros ensaios de caracterização do material e do conjunto em escala, o módulo de compensação em escala real foi montado na bancada para o ensaio do *Bend Stiffener* e *Riser*, ver Figura 104. Logo, uma carga axial, combinada com o ângulo máximo de flexão, foi aplicada para selecionar o conjunto ideal de molas.



Figura 104 - Montagem do módulo de compensação.

A Figura 105 representa o conjunto e o transdutor de posição utilizado na calibração do conjunto de molas. O processo de calibração envolveu a aquisição da carga axial, do módulo de tração, e o deslocamento do módulo de compensação. Com a resposta do deslocamento, foi possível determinar o percentual de carga axial atuante nas molas.

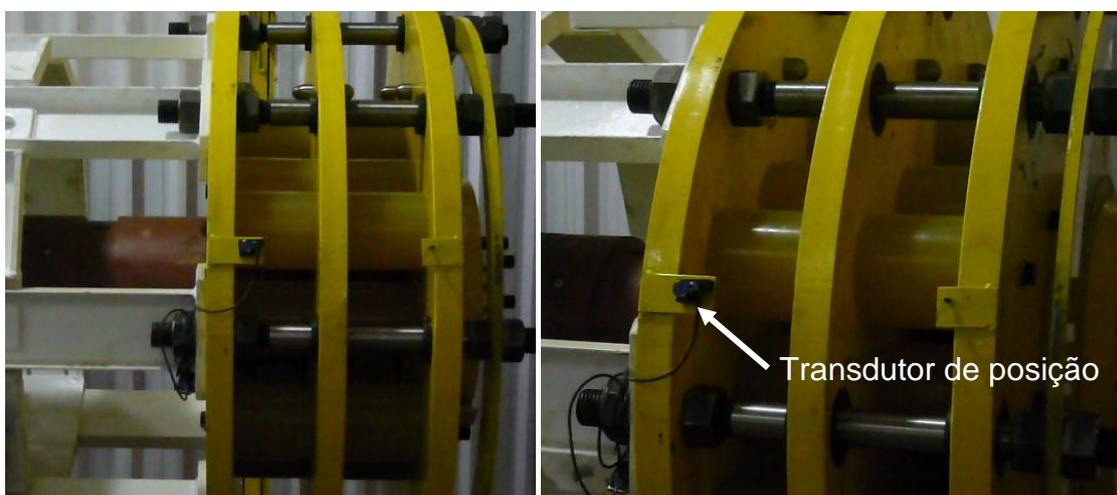


Figura 105 - Módulo montado e calibrado com o conjunto ideal de molas.

Afim de se verificar a calibração do conjunto de molas o carregamento de 300 a 1000KN foi aplicado durante alguns ciclos. De acordo com o dado inicial de projeto, o deslocamento do módulo de compensação deveria ser igual a 50 ± 5 mm para um carregamento axial de 1500KN. Assim, interpolando linearmente chegamos que, para um carregamento axial de 1000KN, o módulo de compensação deveria responder entre os limites de $33,34\pm 3,34$ mm. Como pode ser observado na Figura 106, o deslocamento do conjunto de molas chegou a aproximadamente 29,4mm nos três primeiros ciclos, ou seja, aproximando-se do limite inferior requisitado (30mm). Após a verificação, o conjunto de molas selecionado foi mantido.

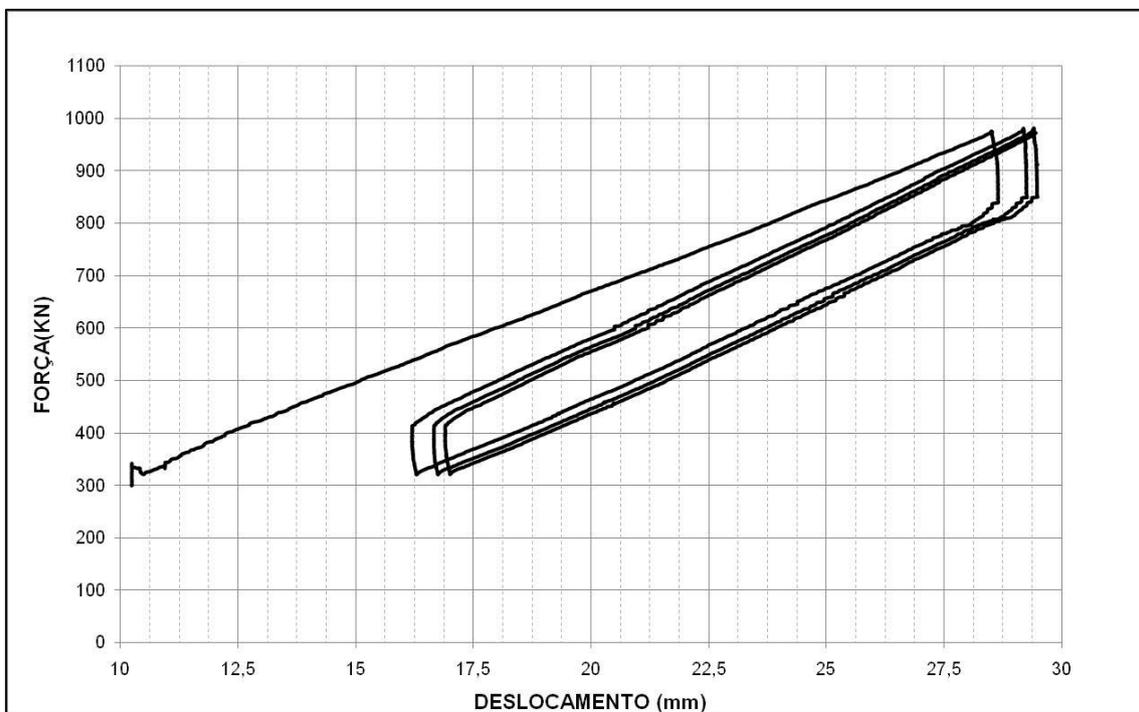


Figura 106 - Força versus deslocamento das molas após a calibração do sistema.

Diferentes blocos de carregamento eram previstos no ensaio. No entanto, este trabalho levou em consideração para análise apenas 15000 ciclos referentes aos primeiros blocos.

O ensaio teve início com o bloco de carregamento axial apresentado na Figura 107, onde a força no módulo de tração oscilava entre 1350KN e 850KN.

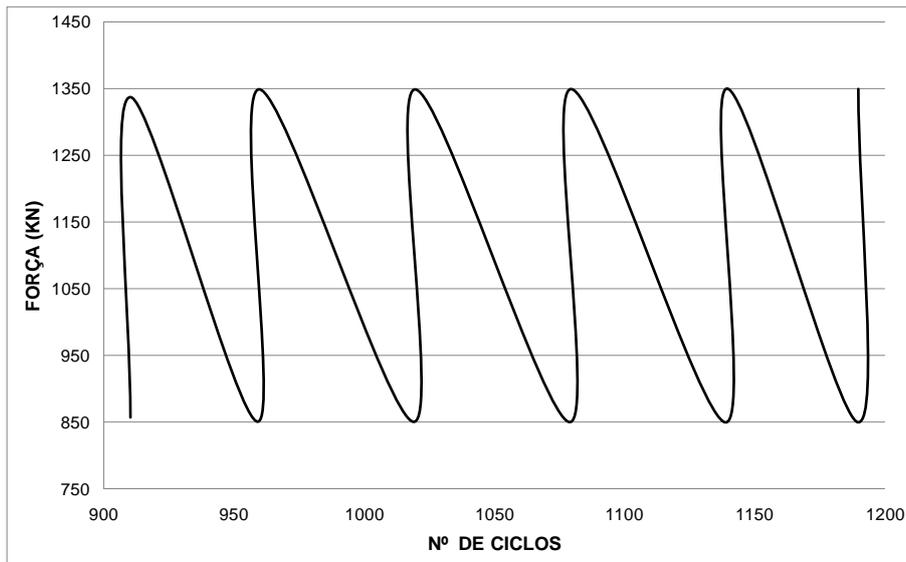


Figura 107 - Perfil de carregamento axial no módulo de tração.

Novamente, ressalta-se que a única restrição para o projeto do módulo de compensação é o deslocamento de 50 ± 5 mm para carga de 1500 kN e, da mesma forma realizada durante a calibração, realizou-se uma interpolação linear para redefinir os novos limites. Onde, para a força axial máxima de 1350 kN, o deslocamento do conjunto de molas deveria ser de $45 \pm 4,5$ mm. A Figura 108 apresenta a resposta de deslocamento do conjunto, iniciando em 39,5 mm, durante a ciclagem do bloco de carregamento em questão.

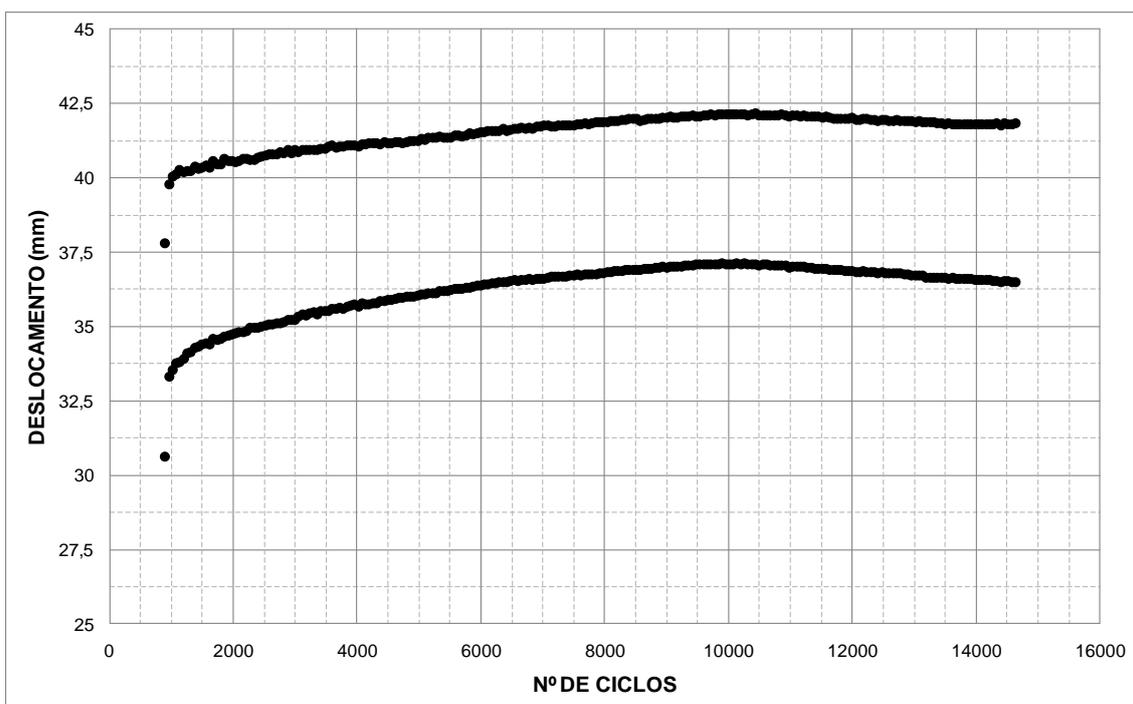


Figura 108 - Comportamento das molas durante o ensaio.

5 CONCLUSÃO

A aplicação mecânica de elastômeros cresce continuamente no setor industrial. Em sua maioria, não requerem alto comprometimento de integridade. Entretanto, quando selecionados para exercer funções onde a responsabilidade de engenharia é predominante, os engenheiros projetistas enfrentam obstáculos como não-linearidade das propriedades mecânicas, histerese, dependência do tempo, da taxa de carregamento e temperatura. Essas características, pouco relevantes em outros materiais como o aço, acabam por criar uma rejeição na seleção de elastômeros.

Muito se avança no desenvolvimento de modelos matemáticos para predição do comportamento mecânico dos elastômeros. Porém, estes modelos, ainda são extremamente dependentes de ensaios experimentais. Para uma aplicação apurada, por exemplo, torna-se praticamente indispensável o uso de modelos em escala e inúmeros ensaios experimentais.

CONCLUSÃO

CONCLUSÃO

CONCLUSÃO

O ensaio do *Riser e Bend Stiffener* não atingiu a ciclagem esperada. No entanto, o número de ciclos registrado, foi suficiente para avaliar o projeto e determiná-lo como bem sucedido.

Por fim, fica registrada neste trabalho, a busca ininterrupta por pesquisa, ciência e desenvolvimento.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AirProducts. (2008). "Engineering Properties of Castable Polyurethane Elastomers." Retrieved Janeiro, 2010, from <http://www.airproducts.com>.
- ANP (2009). Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. G. N. e. B. Agência Nacional do Petróleo. Rio de Janeiro.
- ASTM (1987). Standard Practice for Rubber Properties in Forced Vibration. **D2231-87**.
- ASTM (1991). Standard Test Methods for Rubber Properties in Compression. **D575-91**.
- ASTM (2008). Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. **D695-08**.
- Bergstrom, J. S. and M. C. Boyce (1998). "Constitutive modeling of the large strain time-dependent behavior of elastomers." Journal of the Mechanics and Physics of Solids **46**(5): 931-954.
- Bergstrom, J. S. and M. C. Boyce (2000). "Large strain time-dependent behavior of filled elastomers." Mechanics of Materials **32**(11): 627-644.
- Bergstrom, J. S. and M. C. Boyce (2001). "Constitutive modeling of the time-dependent and cyclic loading of elastomers and application to soft biological tissues." Mechanics of Materials **33**(9): 523-530.
- Bhowmick, A. K. and H. L. Stephens (2001). Handbook of elastomers. New York, Marcel Dekker.
- Boyce, M. C. and E. M. Arruda (2000). "Constitutive models of rubber elasticity: A review." Rubber Chemistry and Technology **73**(3): 504-523.
- Caire, M. (2005). Análise de Enrijecedores à Flexão. Engenharia Oceânica. Rio de Janeiro, COOPPE/UFRJ. **M.Sc**: 115p.
- Cantournet, S., R. Desmorat, et al. (2009). "Mullins effect and cyclic stress softening of filled elastomers by internal sliding and friction thermodynamics model." International Journal of Solids and Structures **46**(11-12): 2255-2264.
- Ciesielski, A. (1999). An introduction to rubber technology. Shawbury, Rapra Technology.
- Cowie, J. M. G. (1991). Polymers: chemistry and physics of modern materials, Blackie.
- De, S. K., J. R. White, et al. (2001). Rubber technologist's handbook. Shawbury, Rapra Technology Ltd.
- Drobny, J. G. (2007). Handbook of thermoplastic elastomers. Norwich, NY, PDL(Plastics Design Library)/William Andrew Pub.
- Eirich, F. R. (1956). Rheology : theory and applications. New York, Academic Press.
- Erhard, G. (2006). Designing with plastics. Cincinnati, Hanser Gardner Publications.
- Gent, A. N. and R. P. Campion (2001). Engineering with rubber : how to design rubber components. Munich, Hanser.
- Gent, A. N. and A. G. Thomas (1958). "Forms for The Stored (Strain) Energy Function for Vulcanized Rubber." Journal of Polymer Science **28**(118): 625-628.
- Harper, C. A. (2004). Handbook of Plastics, Elastomers and Composites, McGraw-Hill.

- Hibbitt, Karlsson, et al. (2008). ABAQUS/Standard User's Manual, V. 6.8. Pawtucket, Rhode Island.
- Hofmann, W. (1989). Rubber technology handbook, Hanser.
- Hoss, L. (2009). Modelos Constitutivos Hiperelásticos para Elastômeros Incompressíveis: Ajuste, Comparação de Desempenho e Proposta de um Novo Modelo. Departamento de Engenharia Mecânica. Porto Alegre, UFRGS. **M.Sc**: 315p.
- Johnson, M. A. and M. F. Beatty (1993). "The mullins effect in uniaxial extension and its influence on the transverse vibration of a rubber string." Continuum Mechanics and Thermodynamics **5**(2): 83-115.
- Kear, K. E. (2003). Developments in thermoplastic elastomers. Shrewsbury, Rapra Technology Limited.
- Kilian, H. G. (1981). "Equation of State of Real Networks." Polymer **22**(2): 209-217.
- Lion, A. (1997). "On the large deformation behaviour of reinforced rubber at different temperatures." Journal of the Mechanics and Physics of Solids **45**(11-12): 1805-1834.
- Marczak, R., L. Hoss, et al. (2006). Caracterização de Elastômeros para Simulação Numérica. São Leopoldo-RS.
- Mark, J. E. and B. Erman (2005). Science and technology of rubber. Oxford, Elsevier Academic Press.
- Miller(a), K. (2000). "Testing Elastomers for Hyperelastic Material Models in Finite Element Analysis." Retrieved Fevereiro, 2010, from <http://www.axelproducts.com/pages/downloads.html>.
- Miller(b), K. (2000). "Experimental Loading Conditions Used to Implement Hyperelastic and Plastic Material Models." Retrieved Março, 2010, from <http://www.axelproducts.com/pages/downloads.html>.
- Mooney, M. (1940). "A theory of large elastic deformation." Journal of Applied Physics **11**(9): 582-592.
- Mullins, L. and N. R. Tobin (1965). "Stress Softening in Rubber Vulcanizates .I. Use of a Strain Amplification Factor to Describe Elastic Behavior of Filler-Reinforced Vulcanized Rubber." Journal of Applied Polymer Science **9**(9): 2993-&.
- Murnaghan, F. D. (1951). Finite deformation of an elastic solid. New York, N. Y., John Wiley & Sons Inc.
- Ogden, R. W. (1972). "Large Deformation Isotropic Elasticity - Correlation of Theory and Experiment for Incompressible Rubberlike Solids." Proceedings of the Royal Society of London Series a-Mathematical and Physical Sciences **326**(1567): 565-&.
- Qi, H. J. and M. C. Boyce (2005). "Stress-strain behavior of thermoplastic polyurethanes." Mechanics of Materials **37**(8): 817-839.
- Riande, E. (2000). Polymer viscoelasticity : stress and strain in practice. New York, Marcel Dekker.
- Rivlin, R. S. and D. W. Saunders (1951). "Large Elastic Deformations of Isotropic Materials Experiments on The Deformation of Rubber." Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series a-Mathematical and Physical Sciences **243**(865): 251-288.
- Thelin, J. H. (1970). "Laboratory Measurement of Abrasion Resistance Using a Free Flowing Abrasive." Rubber Chemistry and Technology **43**(6): 1503-1514.

- Tomita, Y., K. Azuma, et al. (2008). "Computational evaluation of strain-rate-dependent deformation behavior of rubber and carbon-black-filled rubber under monotonic and cyclic straining." International Journal of Mechanical Sciences **50**(5): 856-868.
- Treloar, L. R. G. (1949). The physics of rubber elasticity. Oxford, Clarendon Press.
- Treloar, L. R. G. (2005). The physics of rubber elasticity. Oxford, Oxford University.
- Vermette, P. (2001). Biomedical applications of polyurethanes. Georgetown, Tex., Landes Bioscience.
- Vilar, W. (2004). Química e Tecnologia dos Poliuretanos. Rio de Janeiro, Vilar Consultoria.
- Ward, I. M. and J. Sweeney (2004). An introduction to the mechanical properties of solid polymers. Chichester, Wiley.
- Yeoh, O. H. (1993). "Some Forms of the Strain-Energy Function for Rubber." Rubber Chemistry and Technology **66**(5): 754-771.
- Yeoh, O. H. and P. D. Fleming (1997). "A new attempt to reconcile the statistical and phenomenological theories of rubber elasticity." Journal of Polymer Science Part B-Polymer Physics **35**(12): 1919-1931.